

Рисунок 4

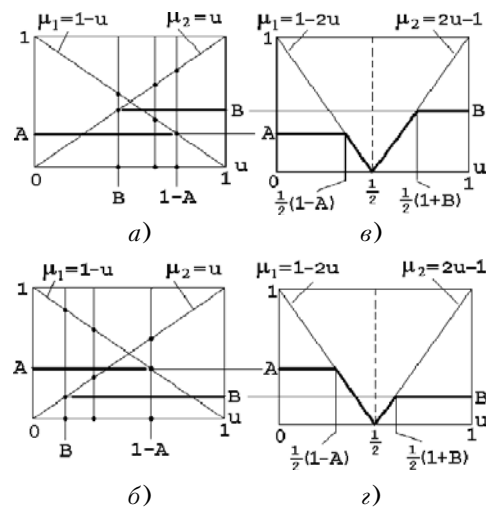


Рисунок 5

в блок сравнения и рассчитанное на каждом шаге h значение $u_c(t)$ преобразуется в выходное напряжение $m(t)$.

В схеме формирователя величин $A(t)$ и $B(t)$ при настройке нечеткого регулятора перестраиваются граничные значения диапазонов $A_m = \theta_{\max} = -\theta_{\min}$, $B_m = \dot{\theta}_{\max} = -\dot{\theta}_{\min}$, $C_m = \ddot{\theta}_{\max} = -\ddot{\theta}_{\min}$. В блоке нормировки выходной переменной перестраиваются граничные значения диапазона $D_m = m_{\max} = -m_{\min}$.

ВЫВОД

Изложенные теория и практическая схема нечеткого регулятора с выходными разбегнутыми треугольными функциями принадлежности и входными треугольными функциями принадлежности дают возможность использовать рассмотренный регулятор в

различных системах автоматического управления и путем настройки параметров регулятора добиваться высокого качества систем.

ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

1. Гостев В. И. Новый метод проектирования одного класса нечетких цифровых регуляторов / В. И. Гостев // Проблемы управления и информатики. – 2007. – № 6. – С. 73–84.

Надійшла 13.10.2008

Отримано аналітичні вираження для керуючих впливів на виході нечіткого регулятора при вихідних роз'єднаних трикутних функціях належності й викладені питання проектування нечіткого регулятора.

Analytical expressions for output control action of a fuzzy regulator at disconnected triangular output functions of belonging were derived. The question of fuzzy regulator design was outlined.

УДК 681.527.2

Е. М. Потапенко, А. Е. Казурова, Е. В. Душинова, Н. В. Ивочка

ВЫСОКОТОЧНОЕ УПРАВЛЕНИЕ СКОРОСТЬЮ ДВУХМАССОВОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Рассматривается указанная в названии статьи управляемая система с неопределенными параметрами, подверженная действию неизвестной нагрузки и трению с неизвестной моделью и параметрами. Синтезированы наблюдатели для идентификации неопределенных параметров и переменных. Разработан комбинированный ре-

гулятор, обеспечивающий высокую точность управления и заданные показатели качества переходных процессов.

ВВЕДЕНИЕ

Под системой, указанной в названии статьи, понимается механическая система, состоящая из ротора

двигателя постоянного тока (Д) (первая масса), упругой трансмиссии (ТМ) и объекта управления (ОУ) (вторая масса). Предполагаются неизвестными сопротивление якоря Д, жесткость ТМ, момент инерции ОУ, а также нагрузка, возникающая при выполнении технологических операций, и возмущающий момент в виде нелинейного трения с неизвестной моделью. Такой механической системой могут быть радиолокаторы, фрагменты прокатных станков, металлообрабатывающих станков, роботы и т. п. Разработка систем управления описанного объекта имеет длинную историю [1–6]. В указанных работах сопротивление якоря Д, жесткость ТМ, момент инерции ОУ, модель и параметры трения считаются известными и закладываются в алгоритмы управления. Однако, сопротивление якоря в зависимости от температуры в процессе работы может меняться в 2 раза. Жесткость также зависит от температуры. Моменты инерции робота могут меняться в несколько раз. До настоящего времени полностью достоверная модель трения до сих пор не создана. Кроме того, коэффициенты модели трения в процессе работы механизма могут меняться в несколько раз. Поэтому высокоточное управление в условиях описанной неопределенности можно обеспечить только за счет применения робастных алгоритмов управления.

Целью данной работы является синтез алгоритмов, робастных по отношению ко всем вышеперечисленным неопределенностям.

Хорошей робастностью по отношению к неопределенности момента инерции ОУ, модели и параметрам трения, нагрузке обладают системы с переменной структурой (СПС), примененные в работах [5, 6]. Работа этих систем сопровождается скользящими режимами. К сожалению, скользящие режимы вызывают вибрации, которые ухудшают надежность системы, повышают ее электропотребление, вызывают появление акустических шумов. Вибрации еще больше усиливаются при наличии высокочастотных помех. Кроме того, СПС в некоторых случаях могут возбуждать высокочастотную паразитную динамику (упругие колебания) вплоть до потери устойчивости. Хорошей робастностью к неопределенностям, быстрым реагированием на ступенчато изменяющиеся воздействия и одновременно при «мягком» управлении без скользящих режимов обладают комбинированные системы управления с оценкой и компенсацией неопределенностей динамики [7–9]. Поскольку в неопределенности включены и внешние воздействия, то указанные системы, помимо робастности, обеспечивают высокую точность управления. Благодаря отсутствию скользящих режимов, эти системы в меньшей степени возбуждают паразитную высокочастотную динамику. Комбинированная система управления с наблюдателем неопределенности была успешно приме-

нена для позиционного управления двухмассовой упругой электромеханической системой [10]. Ниже в соответствии с названием статьи рассматривается управление скоростью.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

На рис. 1 схематично изображена двухмассовая упругая электромеханическая система (ЭМС), где приняты следующие обозначения: I_m, I_c – моменты инерции двигателя и объекта управления, ω_m, ω_c – их угловые скорости, c – жесткость трансмиссии, u – напряжение, прикладываемое к якорной цепи двигателя, f_l, f_c – моменты нагрузки и трения. ЭМС, показанная на рис. 1, описывается следующей системой дифференциальных уравнений:

$$I_c \dot{\omega}_c = m_e - f_c - f_l; \tag{1}$$

$$I_m \dot{\omega}_m = -n^{-1} m_e + c_m i; \tag{2}$$

$$\dot{m}_e = c(n^{-1} \omega_m - \omega_c); \tag{3}$$

$$L \dot{i} + R i = u - c_e \omega_m, \tag{4}$$

где, наряду с обозначениями к рис. 1, m_e – момент упругости; i – ток якорной цепи; R, L – активное сопротивление и индуктивность якорной цепи; c_m, c_e – моментный и скоростной коэффициенты двигателя; n –

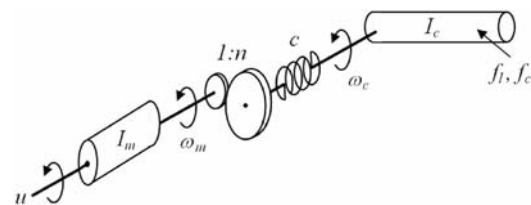


Рисунок 1

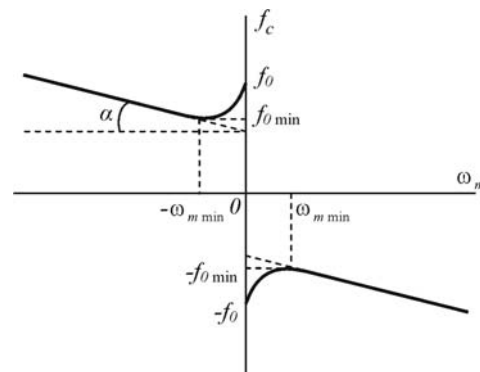


Рисунок 2 – Зависимость трения от скорости

передаточное число редуктора; c – коэффициент жесткости упругой части. В системе (1)–(4) неизвестными являются I_c , f_c , f_l , c , R , m_e . Предполагается, что измеряются i , u , ω_c , ω_m .

В качестве модели трения использовалась модель LuGre [11]. Соответствующая ей зависимость трения от скорости представлена на рис. 2 и описывается уравнениями (5)–(7).

$$f_c = -m \text{ при } \omega_c = 0, \forall |m| \leq f_0, \quad (5)$$

$$f_c = -f_0 \text{sign} m \text{ при } \omega_c = 0, \forall |m| > f_0, \quad (6)$$

$$f_c = -\varphi(|\omega_c|) \text{sign} \omega_c \text{ при } |\omega_c| > 0, \quad (7)$$

где m – сумма всех внешних воздействий на объект, подверженный трению, f_0 – максимальный момент трения покоя.

2 СИНТЕЗ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ

2.1 Идентификация сопротивления якоря двигателя

Идентификацию сопротивления якоря двигателя осуществим с помощью наблюдателя, синтезированного в работе [11] в виде

$$\hat{R}_\delta = z + l_R \frac{1}{2} L i^2, \quad (8)$$

$$\dot{z} = l_R \left[i^2 \left(z + l_R \frac{1}{2} L i^2 \right) - i(u - c_e \dot{\phi}_m) + R_0 i^2 \right], \quad (9)$$

$$\hat{R} = R_0 + \hat{R}_\delta, \quad (10)$$

где \hat{R} , R_0 , \hat{R}_δ – оценка истинного сопротивления, его номинальное значение и оценка отклонения истинного сопротивления от его номинального значения; l_R – коэффициент передачи наблюдателя.

2.2 Оценка момента упругости и ее жесткости

Из уравнения (2) найдем

$$y := m_e = n(c_m i - I_m \dot{\omega}_m). \quad (11)$$

Будем полагать, что жесткость упругого элемента – неизвестная постоянная. Тогда можно записать

$$\dot{c} = 0. \quad (12)$$

Будем рассматривать выражения (3), (12) как динамическую систему, а выражение (11) как ее измерение. Исследуем наблюдаемость переменных m_e , c в

системе (3), (12) при измерении (11). Для этого в соответствии с теоремой 1.31 работы [12] положим $y = m_e \equiv 0$. В этом случае из уравнения (3) при условии

$$n^{-1} \omega_m - \omega_c \neq 0 \text{ тождественно} \quad (13)$$

следует $c \equiv 0$, что свидетельствует о восстанавливаемости системы при выполнении условия (13). Как видно из уравнения (3), условие (13) означает, что одновременная оценка момента упругости и ее жесткости возможна только при изменении момента упругости. Из сказанного следует, что при выполнении условия (13) по системе (3), (12), (11) можно построить наблюдатель для оценки m_e и c . Для этого с помощью обозначений

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} m_e \\ c \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = x, \\ A &= \begin{bmatrix} 0 & (n^{-1} \omega_m - \omega_c) \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \\ C &= [1 \ 0] \end{aligned} \quad (14)$$

запишем систему (3), (12), (11) в пространстве состояний

$$\dot{x} = Ax, \quad y = Cx \quad (15)$$

Для системы (15) наблюдатель имеет вид [12]

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + L(C\hat{x} - y), \quad (16)$$

где $L = (l_m, l_c)^T$ – матрица коэффициентов передачи наблюдателя.

Уравнение ошибок наблюдателя $\tilde{x} = \hat{x} - x$ находится вычитанием из уравнения (16) уравнения (15) в видах

$$\dot{\tilde{x}} = A\tilde{x} + LC\tilde{x} \text{ или } \dot{\tilde{x}} = (A + LC)\tilde{x}. \quad (17)$$

С учетом (14)

$$A + LC = \begin{bmatrix} l_m (n^{-1} \omega_m - \omega_c) \\ l_c \quad 0 \end{bmatrix}. \quad (18)$$

После умножения второго уравнения в (17) слева на \tilde{x}^T можно записать

$$\frac{dV}{dt} = \tilde{x}^T (A + LC) \tilde{x}, \quad V = \frac{1}{2} \tilde{x}^T \tilde{x}, \quad (19)$$

где V – функция Ляпунова. На основании теоремы Ляпунова об асимптотической устойчивости можно утверждать, что для асимптотической устойчивости нулевого решения уравнения (17) достаточно, чтобы

матрица (18) была отрицательно определенной [13]. Для того чтобы матрица (18) была определенно отрицательной, в соответствии с критерием Сильвестра [13] достаточно, чтобы выполнялись условия

$$l_m < 0, \quad l_c(n^{-1}\omega_m - \omega_c) < 0. \quad (20)$$

Для того чтобы наблюдатель был работоспособен вне зависимости от знака выражения (13), примем

$$l_c = \tilde{l}_c \text{sign}(n^{-1}\omega_m - \omega_c), \quad \tilde{l}_c < 0, \quad (21')$$

$$l_c = \tilde{l}_c \text{sign}(n^{-1}\omega_m - \omega_c) (|n^{-1}\omega_m - \omega_c| + \delta)^{-1}, \quad \tilde{l}_c < 0, \quad (21'')$$

где $0 < \delta$ – малая положительная постоянная, ограниченная снизу разрядной сеткой вычислителя.

Характеристический определитель уравнения (17) имеет вид

$$|Ep - (A + LC)|, \quad (22)$$

а соответствующее ему характеристическое уравнение для случая (21'') выглядит так:

$$s^2 - l_m s - \tilde{l}_c = 0. \quad (23)$$

Выбор коэффициентов l_m, \tilde{l}_c осуществим модальным методом [14]. Для этого сопоставим уравнение (23) и стандартное уравнение

$$s^2 + a_1 \omega_0 s + \omega_0^2 = 0, \quad (24)$$

где a_1 – задаваемый коэффициент, определяющий вид переходного процесса, ω_0 – частота, характеризующая быстродействие системы. Приравнивание коэффициентов при одинаковых степенях s в уравнениях (23) и (24) дает следующие значения:

$$l_m = -a_1 \omega_0, \quad \tilde{l}_c = -\omega_0^2. \quad (25)$$

В скалярном виде наблюдатель (16) выглядит так:

$$\dot{\hat{m}}_e = \hat{c}(n^{-1}\omega_m - \omega_c) + l_m[\hat{m}_e - n(c_m i - I_m \dot{\omega}_m)], \quad (26)$$

$$\dot{\hat{c}} = l_c[\hat{m}_e - n(c_m i - I_m \dot{\omega}_m)]. \quad (27)$$

Для устранения необходимости дифференцирования скорости мотора ω_m вводятся обозначения

$$z_1 = \hat{m}_e - l_m n I_m \omega_m, \quad z_2 = \hat{c} - l_c n I_m \omega_m, \quad (28)$$

откуда

$$\hat{m}_e = z_1 + l_m n I_m \omega_m, \quad \hat{c} = z_2 + l_c n I_m \omega_m. \quad (29)$$

С учетом выражений (28), (29) уравнения (26), (27) примут вид

$$\begin{aligned} \dot{z}_1 &= (z_2 + l_c n I_m \omega_m)(n^{-1}\omega_m - \omega_c) + \\ &+ l_m [(z_1 + l_m n I_m \omega_m) - n c_m i], \\ \dot{z}_2 &= l_c [(z_1 + l_m n I_m \omega_m) - n c_m i]. \end{aligned} \quad (30)$$

Для решения системы (30) нет необходимости в дифференцировании скорости ω_m . Оценка искоемых переменных осуществляется по выражениям (29).

2.3 Синтез наблюдателя неопределенности объекта управления

Умножение уравнения (2) на n и последующее сложение с уравнением (1) дают

$$I_c \dot{\omega}_c + n I_m \dot{\omega}_m = n c_m i - f_c - f_l. \quad (31)$$

Из уравнения (4) найдем

$$i = \hat{R}^{-1}(u - c_e \omega_m - L i). \quad (32)$$

В (32) вместо неизвестного истинного сопротивления использована полученная выше его оценка. Неизвестный момент инерции объекта управления представим в виде

$$I_c = I_{c0} + I_{c\delta}, \quad (33)$$

где $I_{c0}, I_{c\delta}$ – номинальное (известное) значение момента инерции и неизвестное отклонение истинного значения момента инерции от его номинального значения. Подстановка выражений (32), (33) в (31) дает

$$I_{c0} \dot{\omega}_c + n I_m \dot{\omega}_m = n c_m \hat{R}^{-1}(u - c_e \omega_m - L i) + f_c - f_e - I_{c\delta} \dot{\omega}_c. \quad (34)$$

В уравнении (34) соберем все неизвестные слагаемые в неопределенность

$$f_{c\Sigma} = f_c + f_e + I_{c\delta} \dot{\omega}_c, \quad (35)$$

с учетом которой уравнение (34) примет вид

$$I_{c0} \dot{\omega}_c + n I_m \dot{\omega}_m = n c_m \hat{R}^{-1}(u - c_e \omega_m - L i) - f_{c\Sigma}. \quad (36)$$

Из уравнения (36) найдем

$$f_{c\Sigma} = -I_{c0} \dot{\omega}_c - n I_m \dot{\omega}_m + n c_m \hat{R}^{-1}(u - c_e \omega_m - L i). \quad (37)$$

В правой части уравнения (37) собраны известные слагаемые. Поэтому выражение (37) можно рассматривать как измерение неопределенности $f_{c\Sigma}$. Выражение (37) содержит производные от измеряемых сигналов. Для устранения необходимости дифференцирования измеряемых сигналов построим наблюдатель неопределенности с таким быстродействием, при котором можно полагать

$$\dot{f}_{c\Sigma} = 0. \quad (38)$$

Это означает, что за время переходного процесса неопределенность меняется незначительно. Предположение (38) также допустимо, когда правая часть в выражении (35) является кусочно непрерывной. По уравнению (38) с измерением $f_{c\Sigma}$ построим наблюдатель

$$\dot{\hat{f}}_{c\Sigma} = l_{\Sigma}(\hat{f}_{c\Sigma} - f_{c\Sigma}), \quad (39)$$

где l_{Σ} – коэффициент передачи наблюдателя, определяющий его быстродействие.

Для получения уравнения ошибки наблюдателя $\tilde{f}_{c\Sigma} = \hat{f}_{c\Sigma} - f_{c\Sigma}$ вычтем из уравнения (39) уравнение (38), в результате чего получим

$$\dot{\tilde{f}}_{c\Sigma} = l_{\Sigma}\tilde{f}_{c\Sigma}. \quad (40)$$

Уравнение (40) имеет решение

$$\tilde{f}_{c\Sigma} = \tilde{f}_{c\Sigma}(0)e^{l_{\Sigma}t}, \quad (41)$$

где $\tilde{f}_{c\Sigma}(0)$ – начальное значение ошибки наблюдателя. Пусть t_t – требуемое время переходного процесса, ε – коэффициент, показывающий во сколько раз должна уменьшиться ошибка за время переходного процесса. Тогда из (41) следует

$$l_{\Sigma} = t_t^{-1} \ln \varepsilon < 0.$$

Для получения рабочей формы наблюдателя подставим выражение (37) в уравнение (31), в результате чего получим

$$\dot{\hat{f}}_{c\Sigma} = l_{\Sigma}[\hat{f}_{c\Sigma} + I_{c0}\dot{\omega}_c + nI_m\dot{\omega}_m - nc_m\hat{R}^{-1}(u - c_e\omega_m - Li)]. \quad (42)$$

Для устранения необходимости дифференцирования измеряемых сигналов введем обозначение

$$z_f = \hat{f}_{c\Sigma} - l_{\Sigma}(I_{c0}\omega_c + nI_m\omega_m - nc_m\hat{R}^{-1}Li), \quad (43)$$

откуда

$$\hat{f}_{c\Sigma} = z_f + l_{\Sigma}(I_{c0}\omega_c + nI_m\omega_m - nc_m\hat{R}^{-1}Li). \quad (44)$$

С учетом обозначений (43), (44) уравнение наблюдателя примет вид

$$\dot{z}_f = l_{\Sigma}[z_f + l_{\Sigma}(I_{c0}\omega_c + nI_m\omega_m - nc_m\hat{R}^{-1}Li) + nc_m\hat{R}^{-1}u]. \quad (45)$$

Уравнение (45) не содержит производных от измеряемых сигналов.

2.4 Закон управления

Закон управления зададим в виде

$$u = u_i + u_m + u_c, \quad (46)$$

где u_i , u_m , u_c – составляющие закона управления, связанные с токовым контуром, двигателем и объектом управления. Закон управления токовым контуром примем в виде

$$u_i = -\hat{R}k_i i, \quad (47)$$

где $k_i = \text{const}$. Тогда уравнение токового контура (4) примет вид

$$T_e \dot{i} + (1 + k_i \hat{R} R^{-1})i = R^{-1}(u_m + u_c - c_e \omega_m), \quad (48)$$

где $T_e = LR^{-1}$. Предполагается, что оценка сопротивления R точная. Поэтому вместо уравнения (48) будем рассматривать уравнение

$$T_e \dot{i} + (1 + k_i)i = R^{-1}(u_m + u_c - c_e \omega_m), \quad (49)$$

полученное из (48) в предположении, что $R = \hat{R}$. Подстановка i из (49) в (2) дает уравнение двигателя

$$I_m \dot{\omega}_m = -n^{-1}m_e + c_{m1}[R^{-1}(u_m + u_c - c_e \omega_m) - T_e \dot{i}], \quad (50)$$

где

$$c_{m1} = c_m(1 + k_i)^{-1}. \quad (51)$$

Закон управления двигателем зададим в виде

$$u_m = k_m \omega_m - kn^{-1} \hat{m}_e \hat{R} c_{m1}^{-1}. \quad (52)$$

В (52) k_m , k – постоянные коэффициенты.

Примечание. Второе слагаемое в выражении (52) искусственно усиливает жесткость трансмиссии.

Подстановка (52) в (50) дает уравнение работы управляемого двигателя в виде

$$I_m \dot{\omega}_m = -(1 + k)n^{-1}m_e + c_{m1}[R^{-1}(u_c - (c_e + k_m)\omega_m) - T_e \dot{i}]. \quad (53)$$

Компенсатор объекта управления в соответствии с принципом комбинированного управления примем в виде

$$u_c = u_{cs} + u_{cc}, \quad (54)$$

Законы стабилизации u_{cs} и компенсации неопределенности u_{cc} задаются в виде

$$u_{cs} = -k_c(\omega_c - \omega_{cp}), \quad (55)$$

$$u_{cc} = (nc_m)^{-1} \hat{R} \hat{f}_\Sigma, \quad (56)$$

где ω_{cp} – программное значение скорости. Вид u_{cc} выбран исходя из того, что в результате последовательной подстановки (56) в (54), а (54) в (36) появится слагаемое $\hat{f}_\Sigma - f_\Sigma$, свидетельствующее о компенсации неопределенности в случае точной работы наблюдателя неопределенности.

Поскольку в реальных системах всегда существует ограничение напряжения, то будем считать, что

$$u = \text{sat}(u_i + u_m + u_c). \quad (57)$$

2.5 Выбор параметров закона управления

При правильном выборе параметров наблюдатель их выходные переменные будут стремиться к их истинным значениям. Поэтому при выборе параметров регулятора будем считать известными все параметры и переменные электромеханической системы и законов управления (47), (52), (54)–(56). Тогда характеристический определитель системы (1)–(4), (47), (52), (54)–(56) будет иметь вид

$$\begin{vmatrix} I_{c0}s & 0 & -1 & 0 \\ 0 & I_ms & n^{-1} & -c_m \\ c & -cn^{-1} & s & 0 \\ k_c R^{-1} - R^{-1}(k_m - c_e) k(nc_{m1})^{-1} T_e s + (1 + k_i) \end{vmatrix}$$

с характеристическим уравнением

$$s^4 + b_1 s^3 + b_2 s^2 + b_3 s + b_4 = 0, \quad (58)$$

где

$$\begin{aligned} b_1 &= (I_{c0} I_m T_e)^{-1} [I_{c0} I_m (1 + k_i)], \\ b_2 &= (I_{c0} I_m T_e^{-1}) [I_m T_e c + I_{c0} (T_e c n^{-2} + c_m R^{-1} (c_e - k_m))], \\ b_3 &= (I_{c0} I_m T_e)^{-1} [I_{c0} c n^{-2} (1 + k_i + c_m c_1^{-1} k) + I_m (c + k_i)], \\ b_4 &= (I_{c0} I_m T_e)^{-1} [c R^{-1} c_m (k_c n^{-1} - k_m + c_e)]. \end{aligned} \quad (59)$$

Для синтеза закона управления воспользуемся модальным методом [14], в соответствии с которым характеристическому уравнению (58) сопоставим стандартное характеристическое уравнение

$$s^4 + a_1 \omega_0 s^3 + a_2 \omega_0^2 s^2 + a_3 \omega_0 s + \omega_0^4 = 0, \quad (60)$$

где a_1, a_2, a_3 – заданные коэффициенты, ω_0 – частота, определяющая быстродействие системы. Приравняв коэффициенты при одинаковых степенях s , получим систему уравнений для определения коэффициентов закона управления k_c, k_m, k, c_{m1}, k_i , обеспечивающих заданные показатели качества синтезируемой системы управления.

3 ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Моделированию подлежит система уравнений (1)–(10), (21), (28)–(30), (44)–(47), (51), (52), (54)–(57) с измерениями i, u, ω_c, ω_m . Неизвестными являются I_c, f_c, f_l, c, R, m_e . При моделировании принимались следующие параметры: $I_{c0} = 250 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, момент инерции считается неизвестным и находится в диапазоне $I_c = (0, 5 \dots 2) I_{c0}$, $I_m = 27 \cdot 10^{-5} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, $R_0 = 0,075 \text{ Ом}$, сопротивление принимается равным $R = (0, 67 \dots 1, 5) R_0$, $L = 3, 375 \cdot 10^{-4} \text{ Гн}$, $n = 377$, $c_0 = 3 \cdot 10^5 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{рад}^{-1}$, $c_m = 0,062 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{А}^{-1}$, $c_e = 0,062 \text{ В} \cdot \text{с} \cdot \text{рад}^{-1}$, $f_l = 0 \dots 500 \text{ Н} \cdot \text{м}$, $f_c = 200 \text{ Н} \cdot \text{м}$, $f_m = 0 \text{ Н} \cdot \text{м}$, пусковой ток 360 А, напряжение питания двигателя 27 В. Для модели трения брались следующие значения: $f_{\min} = 0,67 f_0$, $\dot{x}_{\min} = 0,4 \text{ рад/с}$.

В данной работе применяется адаптивное управление с идентификацией сопротивления R и жесткости c и комбинированное управление с оценкой неизвестных возмущений, возникающих за счет неопределенности I_c, f_c, f_l , и компенсации этих возмущений, а также оценка момента упругости m_e . Таким образом, собственно управление осуществляется полностью определенным объектом. Самым сложным в данной работе является идентификация параметров и оценка возмущений и неизвестной координаты. Поэтому иллюстративный материал будет ограничен только результатами идентификации параметров и оценки переменных.

На рис. 3 и 4 показаны скорости ОУ и двигателя соответственно. Нагрузка $f_l = 500 \text{ Н} \cdot \text{м}$ в виде ступенчатого сигнала прикладывалась на 0,5 с. На рис. 5 представлена разность скоростей, приведенных к ОУ. Изменение тока показано на рис. 6. Сравнение оценок и истинных значений момента упругости и жесткости дано на рис. 7, 8. Сопоставление оценки суммарной неопределенности с ее истинным значением при номинальном моменте инерции ОУ представлено на рис. 9, а при удвоенном – на рис. 10. Рис. 11 иллюстрирует процесс идентификации сопротивления.

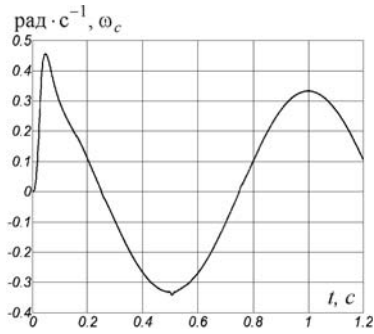


Рисунок 3

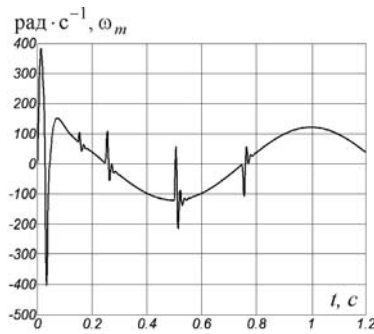


Рисунок 4

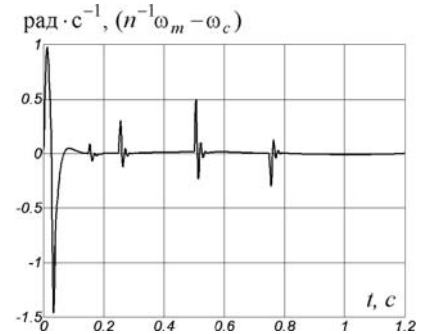


Рисунок 5

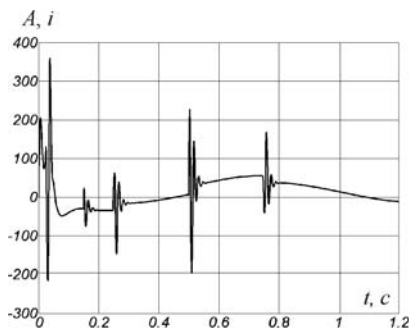


Рисунок 6

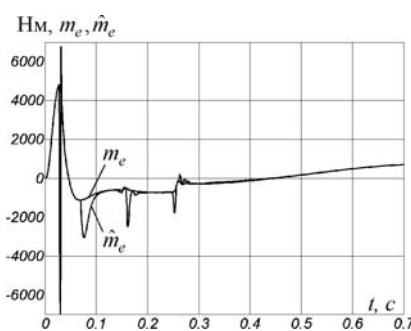


Рисунок 7

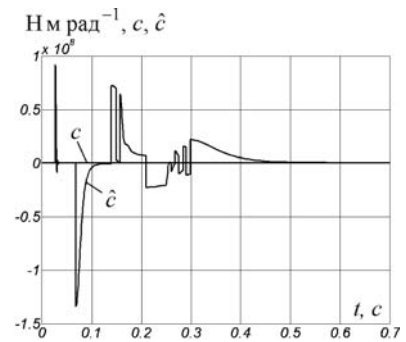


Рисунок 8

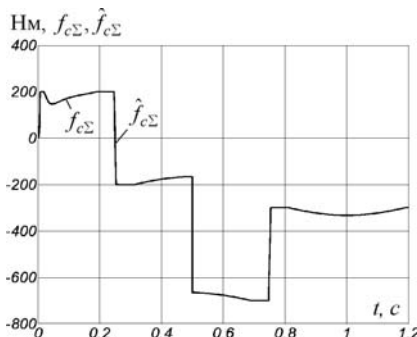


Рисунок 9

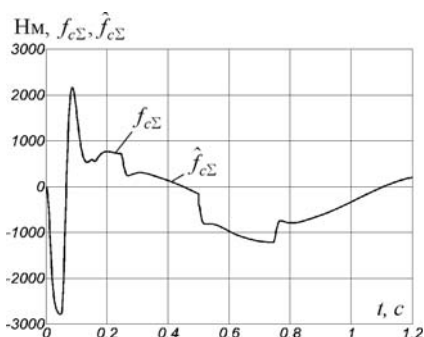


Рисунок 10

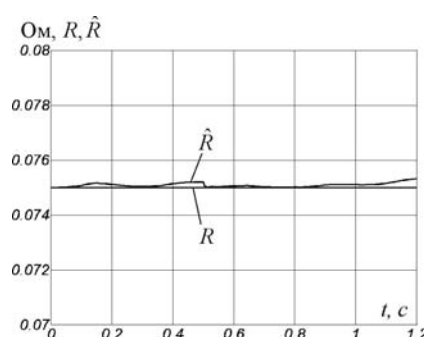


Рисунок 11

Анализ рисунков свидетельствует о высокой точности оценки момента упругости и неопределенности ОУ при изменении момента инерции, нагрузки, модели и параметров трения в широких диапазонах. Сопротивление якорной цепи ротора хорошо оценивается в переходных процессах и при действии нагрузки, так как в этих случаях ток не равен нулю. Это хорошо согласуется с физической сущностью электрических процессов. Поэтому можно рекомендовать при нулевых токах сохранять предыдущие оценки. Оценки момента упругости и жесткости нарушаются в окрестности значения скорости $l_c(n^{-1}\omega_m - \omega_c) = 0$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье, так же, как и в публикациях [1–6], разрабатываются алгоритмы управления скоростью двухмассовой упругой системы. В отличие от перечисленных работ, в данной статье предполагаются неизвестными сопротивление якорной цепи двигателя постоянного тока, жесткость упругой части механической системы, момент инерции объекта управления, модель и параметры трения, действующего на объект управления. Для оценки сопротивления, жесткости и величины момента упругости синтезированы идентификаторы в виде наблюдателей, доказана их

сходимость и получены зависимости, позволяющие оптимизировать наблюдатели. Часть инерционного момента, обусловленная неопределенностью момента инерции, объединена с моментами нагрузки и трения в неопределенность, которая оценивается с помощью наблюдателя и компенсируется комбинированным управлением. За счет перечисленных мероприятий достигается высокая точность управления. Характерно то, что задачи обеспечения высокой точности и заданных показателей качества переходных процессов решаются независимо. Другой особенностью разработанной системы управления является отсутствие необходимости знания модели трения и ее параметров. Численное моделирование подтверждает работоспособность синтезированных алгоритмов.

ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

1. Башарин А. В. Управление электроприводами / Башарин А. В., Новиков В. А., Соколовский Г. Г. – Ленинград : Энергоиздат, Ленинградское отделение, 1982. – 392 с.
2. Егоров В. Н. Динамика систем электропривода / Егоров В. Н., Шестаков В. М. – Ленинград : Энергоатомиздат, Ленинградское отделение, 1983. – 216 с.
3. Борцов Ю. А. Автоматизированный электропривод с упругими связями / Борцов Ю. А., Соколовский Г. Г. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб. : Энергоатомиздат, Санкт-Петербург. отд-ние, 1992. – 288 с.
4. Акимов Л. В. Синтез упрощенных структур двухмассовых электроприводов с нелинейной нагрузкой / Акимов Л. В., Долбня В. Т., Клепиков В. Б., Пирожок А. В. – Харьков : НТУ «ХПИ» ; Запорожье : ЗНТУ, 2002. – 160 с.
5. Волянский Р. С. Оптимальное управление двухмассовым асинхронным электроприводом с люфтом / Волянский Р. С., Садовой А. В. // Электротехника. – 2004. – № 6. – С. 11–14.
6. Горелов П. В. Релейно-модальное управление двухмассовыми электромеханическими системами / Горелов П. В., Мотченко А. И., Морозов Д. И. // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – 2008. – № 30. – С. 120–123.
7. Потапенко Е. М. Сравнительная оценка робастных систем управления с различными типами наблюдателей / Потапенко Е. М. // Изв. РАН. Теория и системы управления. – 1995. – № 1. – С. 109–116.
8. Потапенко Е. М. Робастные комбинированные системы управления с наблюдателями / Потапенко Е. М. // Проблемы управления и информатики. – 1995. – № 2. – С. 36–44.
9. Потапенко Е. М. Исследование робастности систем управления с наблюдателями / Потапенко Е. М. // Изв. РАН. Теория и системы управления. – 1996. – № 2. – С. 104–108.
10. Потапенко Е. М. Высокоточное управление упругой электромеханической системой с нелинейным трением / Потапенко Е. М., Казурова А. Е. // Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. – 2008. – № 1(21). – С. 118–125.
11. С. Canudas-de-Wit. A new model for control of systems with friction / С. Canudas-de-Wit, H. Olsson, K. J. Astrom, and P. Lischinsky // IEEE Transactions on Automatic Control. – 1995. – Vol. 40. – Pp. 419–425.
12. Квакуернаак Х. Линейные оптимальные системы управления / Квакуернаак Х., Сиван Р. – М. : Мир, 1977. – 650 с.
13. Меркин Д. Р. Введение в теорию устойчивости движения / Меркин Д. Р. – М. : Гл. ред. физ.-мат. лит. изд-ва «Наука», 1971. – 312 с.
14. Кузовков Н. Т. Модальное управление и наблюдающие устройства / Кузовков Н. Т. – М. : Машиностроение, 1976. – 184 с.

Надійшла 18.07.2008

Розглядається вказана у назві статті пружна система з невизначеними параметрами, яка зазнає дію невідомого навантаження та тертя з невідомими моделлю та параметрами. Синтезовано спостережники для ідентифікації невизначених параметрів та змінних. Розроблено комбінований регулятор, який забезпечує високу точність керування та задані показники якості перехідних процесів.

The elastic system with undermined parameters, which is subjected to influence of uncertain load and friction with unknown model and unknown parameters was considered. Observers for identification of uncertain parameters and variables were synthesized. Combined regulator, ensuring high precision control and prescribed control performance indexes was developed.