

УДК 681.5.11

Синтез следящего электропривода азимутальной оси телескопа с эталонной моделью в контуре положения

Демидова Г.Л., ассист., Ловлин С.Ю., Цветкова М.Х., аспиранты

Предлагается структура алгоритма управления следящим электроприводом с эталонной моделью в контуре положения. Приведены результаты структурно-параметрической оптимизации, направленной на устранение «шагающего» режима.

Ключевые слова: система управления, регулятор, эталонная модель, шагающий режим, сухое трение.

Synthesis of Follow-up Electric Drive of telescope's azimuth axis with reference model in position contour

G.L. Demidova, Assistant, S.Yu. Lovlin, M.Kh. Tsvetkova, Post Graduate Students

The article presents the structure of control algorithm for the follow-up electric drive with reference model in the position contour. The authors present the results of structural and parametric optimization, aimed at step mode eliminating.

Keywords: control system, regulator, reference model, step mode, dry friction.

Введение. Создание высокоточных, надежных и долговечных систем автоматического управления, работающих в жестких условиях эксплуатации, в большинстве случаев возможно только на основе реализации цифровых безредукторных следящих систем (ЦБСС) [1–3]. При этом наилучшая гибкость управления механическим движением достигается за счет использования высокомоментного синхронного двигателя с самокоммутацией (вентильного двигателя). Такой электропривод обычно называется безредукторным или прямым электроприводом с вентильным двигателем [3].

По своим точностным и динамическим характеристикам, а также по показателям надежности и долговечности работы приборы с безредукторными системами существенно превосходят приборы с редукторными приводами, однако преимуществ последних по массогабаритным показателям и энергопотреблению в отдельных случаях делают их применение единственно возможным [1–3]. Так, мощности отдельных образцов прямого электропривода достигают сотен киловатт, а типовые значения погрешностей углового и линейного позиционирования – единиц секунд и микрометров, что с полным правом позволяет назвать такой привод прецизионным (высокоточным). Сфера применения прецизионного прямого электропривода включает машиностроение, робототехнику, электронную индустрию, измерительную технику и специальные технические устройства [3].

К числу актуальных проблем современной электромеханики и преобразовательной техники относится проблема управления прецизионными следящими электроприводами для оптико-механических систем и, в частности, для комплексов позиционирования и слежения. При управлении прецизионными следящими электроприводами, такими как, например,

электромеханическая система телескопа, на инфранизких скоростях (скорости, сравнимые со скоростью вращения Земли) в условиях нежесткости оси точность слежения за сигналом задания уменьшается [5–7].

Наличие сухого трения тоже отрицательно влияет на точность реализации заданных программных траекторий систем управления. Это связано с тем, что момент, создаваемый сухим трением, описывается функцией, разрывной относительно обобщенной скорости (сила трения изменяется скачкообразно при изменении направления движения) [4]. Как правило, при движении с инфранизкой скоростью этот факт приводит к «шагающему» режиму, колебаниям системы, вызванным реакцией на частые скачки возмущающего воздействия. Условие отсутствия «шагающего» режима – движение электропривода со скоростью, средняя величина которой превышает амплитуду ее колебаний. Таким образом, для повышения точности таких систем вводится нижняя граница скоростей.

Ниже предлагается алгоритм управления, позволяющий расширить нижнюю границу скоростей.

Постановка задачи. Наличие «шагающего» режима свойственно электроприводам, движущимся на инфранизких скоростях, вплоть до нулевых скоростей (режим позиционирования). Стандартные методы повышения точности путем увеличения порядка астатизма не могут бороться с нелинейными возмущениями типа сухого трения. Кроме того, именно наличие астатизма по возмущающему воздействию способствует возникновению «шагающего» режима, а в статических системах он отсутствует.

Одно из наиболее простых решений – создание таблицы моментов трения. Значения моментов трения в зависимости от угла поворота записываются в таблицу и затем исполь-

зуются в качестве добавки к управлению с соответствующим знаком. Однако это требует огромных вычислительных затрат (необходимо где-то хранить эту таблицу). Кроме того, возможно изменение трения при изменении температуры с течением времени из-за механических воздействий и изменения свойств смазки.

Метод адаптивной компенсации сухого и вязкого трения [4] позволяет эффективно решить проблему только в случае отсутствия активного трения на валу.

Метод, рассматриваемый в данной работе, ориентирован на структурно-параметрическую оптимизацию системы управления по возмущающему воздействию. Кроме стандартных контуров подчиненной системы регулирования [5] в систему управления вводится дополнительный контур положения с эталонной моделью (рис. 1).

Система управления с эталонной моделью в контуре положения обладает одним привлекательным свойством: введение дополнительного контура никак не влияет на передаточную функцию системы по задающему воздействию при условии того, что эталонная модель будет соответствовать передаточной функции контура положения. Действительно, при отсутствии возмущающего воздействия на входе регулятора контура с эталонной моделью $W_{РЭМ}(p)$ будет всегда ноль (рис. 1). Таким образом, можно добиться различных передаточных функций контура положения по возмущению при одинаковых передаточных функциях по заданию.

Итак, задача состоит в том, чтобы найти такую настройку контура с эталонной моделью, что влияние сухого трения будет минимальным.

Настройка основных контуров. Отсутствие датчиков на второй массе в прецизионных следящих электроприводах для оптико-механических систем с нежесткими осями не

позволяет применять традиционные методы настройки в связи с возможностью возникновения механического резонанса [5]. Поэтому оптимизация системы осуществляется настройкой контура положения на «симметричный оптимум» на основании выражений, представленных в [5].

В качестве примера объекта управления был выбран вентильный двигатель (ВД) ДБМ 1200-1200 с двухмассовой нагрузкой с моментами инерции первой массы $J_1 = 35,28 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, второй массы $J_2 = 94,34 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, с жесткостью $C_{12} = 1,874 \text{ Н}\cdot\text{м}/\text{рад}$. На двигатель действует момент сопротивления на первой массе $M_{C1} = 40 \text{ Н}\cdot\text{м}$ и момент сопротивления на второй массе $M_{C2} = 40 \text{ Н}\cdot\text{м}$. В качестве модели трения выбрана модель с эффектом Штрибека. При настройке основных контуров двухмассовая модель (рис. 1) представляется в виде эквивалентной одномассовой [5], поэтому моменты сопротивления масс далее при настройке контура с эталонной моделью будут рассматриваться как эквивалентное возмущающее воздействие. В таблице R_ϕ – сопротивление фазной обмотки ВД; T_ϕ – электрическая постоянная времени фазной обмотки ВД; C_E – коэффициент по противо-ЭДС; $K_{СТ}$ – статический коэффициент передачи широтно-импульсного преобразователя (ШИП); T_3 – некомпенсируемая постоянная времени запаздывания ШИП; $K_{ДТ}$, $K_{ДС}$, $K_{ДП}$ – коэффициенты передачи датчиков тока, скорости и положения соответственно; ω_0 – полоса пропускания частот в скоростной подсистеме, вычисляемая по следующей формуле:

$$\omega_0 = \frac{\sqrt{C_{12}(J_1 + J_2)}}{4\sqrt{J_1 J_2}}.$$

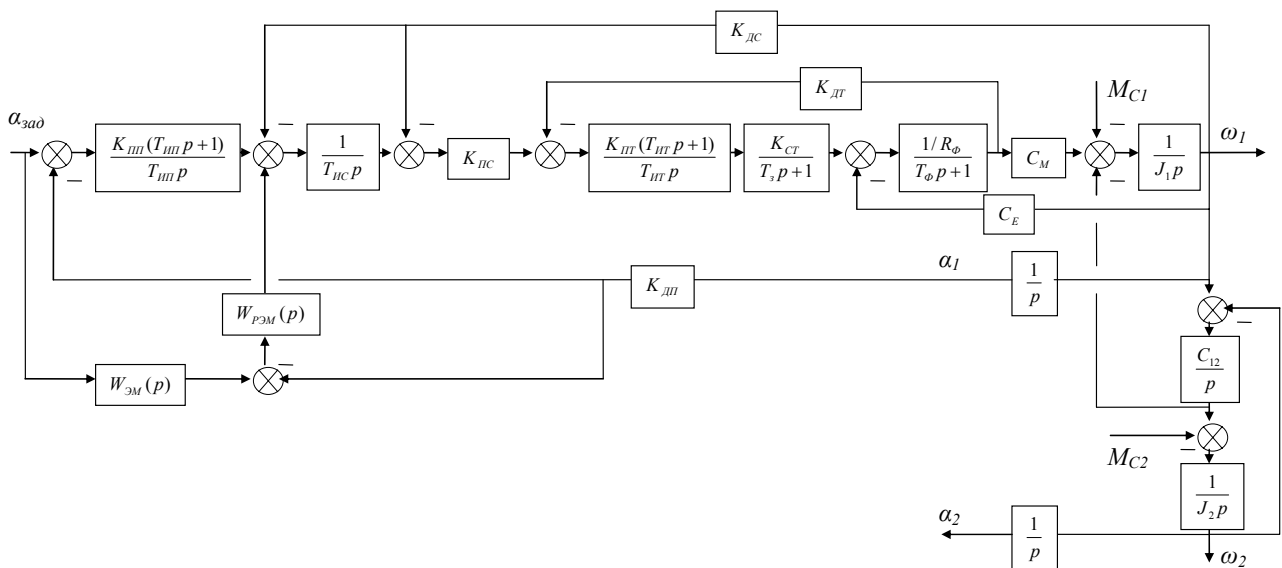


Рис. 1. Структурная схема системы с эталонной моделью в контуре положения: $\alpha_{зад}$ – сигнал задания; α_1 и α_2 – углы первой и второй масс; ω_1 и ω_2 – скорости первой и второй масс; C_M – коэффициент по моменту

Параметры регуляторов основных контуров

ПИ-регулятор контура тока	Коэффициент передачи П-регулятора	$K_{ПТ} = \frac{R_{\Phi} T_{\Phi}}{2T_3 K_{СТ} K_{ДТ} \cdot 1,5}$
	Время изодома И-регулятора	$T_{ИТ} = T_{\Phi}$
Контур скорости	Коэффициент передачи П-регулятора внутреннего контура	$K_{ПС} = \frac{K_{ДТ} \omega_0 (J_1 + J_2)}{K_{ДС} C_E}$
	Время изодома И-регулятора внешнего контура	$T_{ИС} = \frac{2}{\omega_0}$
ПИ-регулятор контура положения	Коэффициент передачи П-регулятора	$K_{ПП} = \frac{K_{ДС} \omega_0}{4K_{ДП}}$
	Время изодома И-регулятора	$T_{ИП} = \frac{8}{\omega_0}$

На основании выбранной настройки эталонная модель будет иметь следующую передаточную функцию:

$$W_S(p) = \frac{4T_{\mu p} p + 1}{8T_{\mu p}^3 p^3 + 8T_{\mu p}^2 p^2 + 4T_{\mu p} p + 1},$$

где $T_{\mu p} = 2T_{\mu s} = 2/\omega_0$.

Синтез и настройка регулятора контура с эталонной моделью. Синтез передаточной функции по возмущению. Передаточная функция контура положения по возмущающему воздействию (рис. 1) в общем случае будет иметь следующий вид:

$$W_{\text{возм.}\alpha}(p) = \frac{\frac{T_{ИС} K_{ДТ}}{K_{ПС} K_{ДС}} p (T_{ИТ} p + 1)}{(2T_{\mu s}^2 p + 2T_{\mu s} p + 1)p + \left(W_{РЭМ} + \frac{K_{ПП}(T_{ИП} p + 1)}{T_{ИП} p} \right) \frac{K_{ДП}}{K_{ДС}}}. \quad (1)$$

Тогда при подстановке значений из таблицы в (1) получим

$$W_{\text{возм.}\alpha}(p) = \frac{\frac{64C_E}{\omega_0^4 J_{\Sigma}} p^2 (T_{\Phi} p + 1)}{\frac{64}{\omega_0^4} p^4 + \frac{64}{\omega_0^3} p^3 + \frac{32}{\omega_0^2} p^2 + \frac{8}{\omega_0} p + 1 + W_{РЭМ} \frac{4K_{ДП}}{\omega_0 K_{ДС}} p},$$

где $J_{\Sigma} = J_1 + J_2$.

Реакцию скорости на возмущение можем узнать, добавив дифференциальное звено в (1):

$$W_{\text{возм.}\omega}(p) = \frac{\frac{64C_E}{\omega_0^4 J_{\Sigma}} p^3 (T_{\Phi} p + 1)}{\frac{64}{\omega_0^4} p^4 + \frac{64}{\omega_0^3} p^3 + \frac{32}{\omega_0^2} p^2 + \frac{8}{\omega_0} p + 1 + W_{РЭМ} \frac{4K_{ДП}}{\omega_0 K_{ДС}} p}. \quad (2)$$

Рассмотрим возможные варианты передаточной функции (2) в зависимости от $W_{РЭМ}$. Анализировать их свойства будем по реакции на скачок возмущающего воздействия при наличии момента сухого трения. Результаты приведены на рис. 2, в качестве выхода был выбран угол, а не скорость, так как именно он является конечной настраиваемой величиной.

Графикам 1–4 (рис. 2) соответствует следующая передаточная функция контура положения с эталонной моделью:

$$W_{\text{возм.}\alpha}(p) = \frac{K_M p^2 (T_{\Phi} p + 1)}{(T_1^2 p^2 + 2\xi T_1 p + 1)(T_2 p + 1)(T_3 p + 1)},$$

где $\xi = 1$, $T_2 = T_{\Phi}$ – для графика 1; $\xi < 1$, $T_2 = T_{\Phi}$ – для графика 2; $\xi < 1$, $T_2 > T_{\Phi}$, $T_1 < T_{\Phi}$ – для графика 3; $\xi = 1$, $T_2 > T_{\Phi}$, $T_1 > T_{\Phi}$ – для графика 4. Графику 5 соответствует передаточная функция

$$W_{\text{возм.}\alpha}(p) = \frac{K_M p^3 (T_{\Phi} p + 1)}{(T_1 p + 1)^3 (T_2 p + 1)}.$$

Очевидно, что наиболее приемлемыми вариантами являются передаточные функции, соответствующие графикам 1 и 4, т.е. передаточная функция (2) должна обладать следующими свойствами: отсутствием комплексных корней в характеристическом уравнении и минимальным порядком астатизма:

$$W_{\text{возм.}\alpha}(p) = \frac{K_M p^2 (T_{\Phi} p + 1)}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)(T_3 p + 1)(T_4 p + 1)}. \quad (3)$$

Синтез регулятора эталонной модели. Для настройки системы управления с передаточной функцией (2) необходим следующий регулятор:

$$W_{РЭМ}(p) = K_6 p^4 + K_5 p^3 + K_4 p^2 + K_3 p + K_2 + \frac{K_1}{p}.$$

Передаточная функция (2) примет вид

$$W_{\text{возм.}\omega}(p) = \frac{\frac{64C_E}{\omega_0^4 J_{\Sigma} K_1} p^3 (T_{\Phi} p + 1)}{\frac{K_6}{K_1} p^5 + \frac{64K_5'}{\omega_0^4 K_1} p^4 + \frac{64K_4'}{\omega_0^3 K_1} p^3 + \frac{32K_3'}{\omega_0^2 K_1} p^2 + \frac{8K_2'}{\omega_0 K_1} p + 1}, \quad (4)$$

где

$$K_1' = \frac{4K_{ДП} K_1}{\omega_0 K_{ДС}} + 1; \quad K_2' = \frac{K_{ДП} K_2}{2K_{ДС}} + 1;$$

$$K_3' = \frac{K_{ДП} \omega_0 K_3}{8K_{ДС}} + 1; \quad K_4' = \frac{K_{ДП} \omega_0^2 K_4}{16K_{ДС}} + 1;$$

$$K_5' = \frac{K_{ДП} \omega_0^3 K_5}{16K_{ДС}} + 1.$$

Коэффициент K_6 обеспечит относительную степень передаточной функции (4), равную единице, придаст ЛАЧХ передаточной функции наклон -20 Дб/дек в области высоких частот и позволит регулировать коэффициент усиления по возмущающему воздействию. Однако четыре последовательно-соединенных дифференциальных звена в цифровых прецизионных системах создают существенные шумы дискретизации.

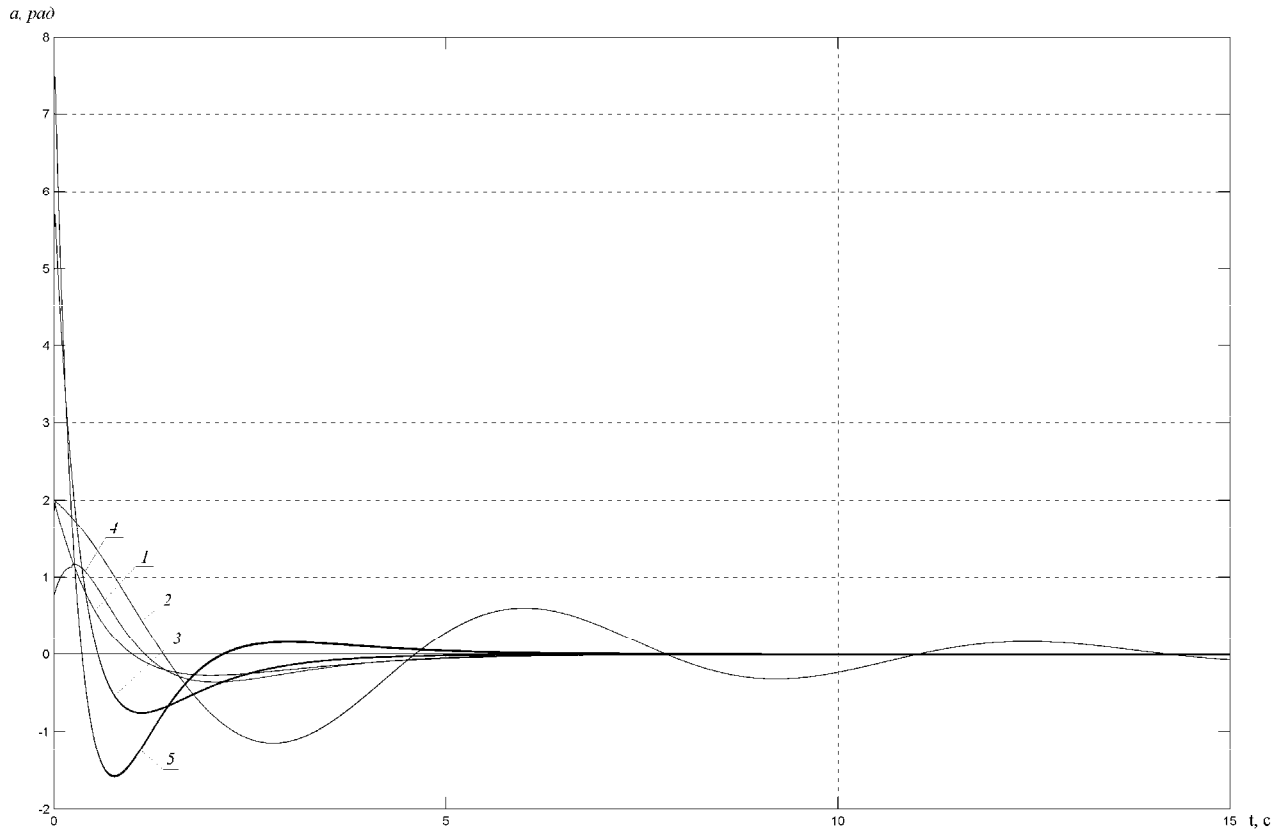


Рис. 2. Результаты моделирования системы с различными передаточными функциями по возмущению при наличии сухого трения

Такая же проблема и с коэффициентами K_5 и K_4 , поэтому $K_6 = K_5 = K_4 = 0$, а коэффициент усиления по возмущающему воздействию в области высоких частот будет постоянным и равным $C_E T_\phi / J_\Sigma$. С учетом выше сказанного, а также формул (3) и (4) получим

$$\frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2} + \frac{1}{T_3} + \frac{1}{T_4} = \omega_0. \quad (5)$$

Одна из постоянных времени T_1, T_2, T_3, T_4 должна быть меньше T_ϕ . Это одно из необходимых условий минимальности коэффициента усиления по возмущающему воздействию на всем диапазоне частот. Согласно (5), настраиваемые постоянные времени ограничены конечной величиной, и данное условие неосуществимо при $T_\phi < \omega_0^{-1}$. Тогда одна из постоянных времени (пусть T_4) должна быть минимальной, а максимальный коэффициент усиления будет на частоте $1/T_4$ равным $C_E T_4 / J_\Sigma$, т.е. $T_4 \ll (T_1, T_2, T_3)$. В таком случае

$$\frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2} + \frac{1}{T_3} = \frac{\omega_0 K'_1}{2}, \quad (6)$$

$$T_1 T_2 T_3 = \frac{64}{\omega_0^3 K'_1}. \quad (7)$$

Согласно вышеописанному условию и уравнениям (6) и (7), получаем $T_1 = T_2 = T_3$. Очевидно, что $K'_1 = 1$ – наиболее оптимальный вариант для выполнения $T_4 \ll (T_1, T_2, T_3)$, т.е. $K_1 = 0$.

Итак, для настройки контура с эталонной моделью необходим ПД-регулятор со следующей передаточной функцией:

$$W_{РЭМ}(p) = K_D p + K_P.$$

Настройка регулятора эталонной модели. Коэффициенты регулятора рассчитываются исходя из вышеописанных условий и формулы (4):

$$K_P = \frac{K_{ДС}}{K_{ДП}},$$

$$K_D = \frac{4K_{ДС}}{K_{ДП}\omega_0}.$$

Результаты эксперимента. Результаты моделирования реакции на линейное задающее воздействие с инфранизкой скоростью 1"/с изображены на рис. 3. В системе подчиненного регулирования без эталонной модели отчетливо видны колебания, превышающие среднюю скорость в несколько раз. В системе с эталонной моделью эти колебания минимальны и обусловлены только лишь конечной разрядностью датчиков. Реверсивный режим работы электропривода не рассматривался, так как он возможен только в режиме переброса [2], а в этом режиме высокие точности движения электропривода не требуются.

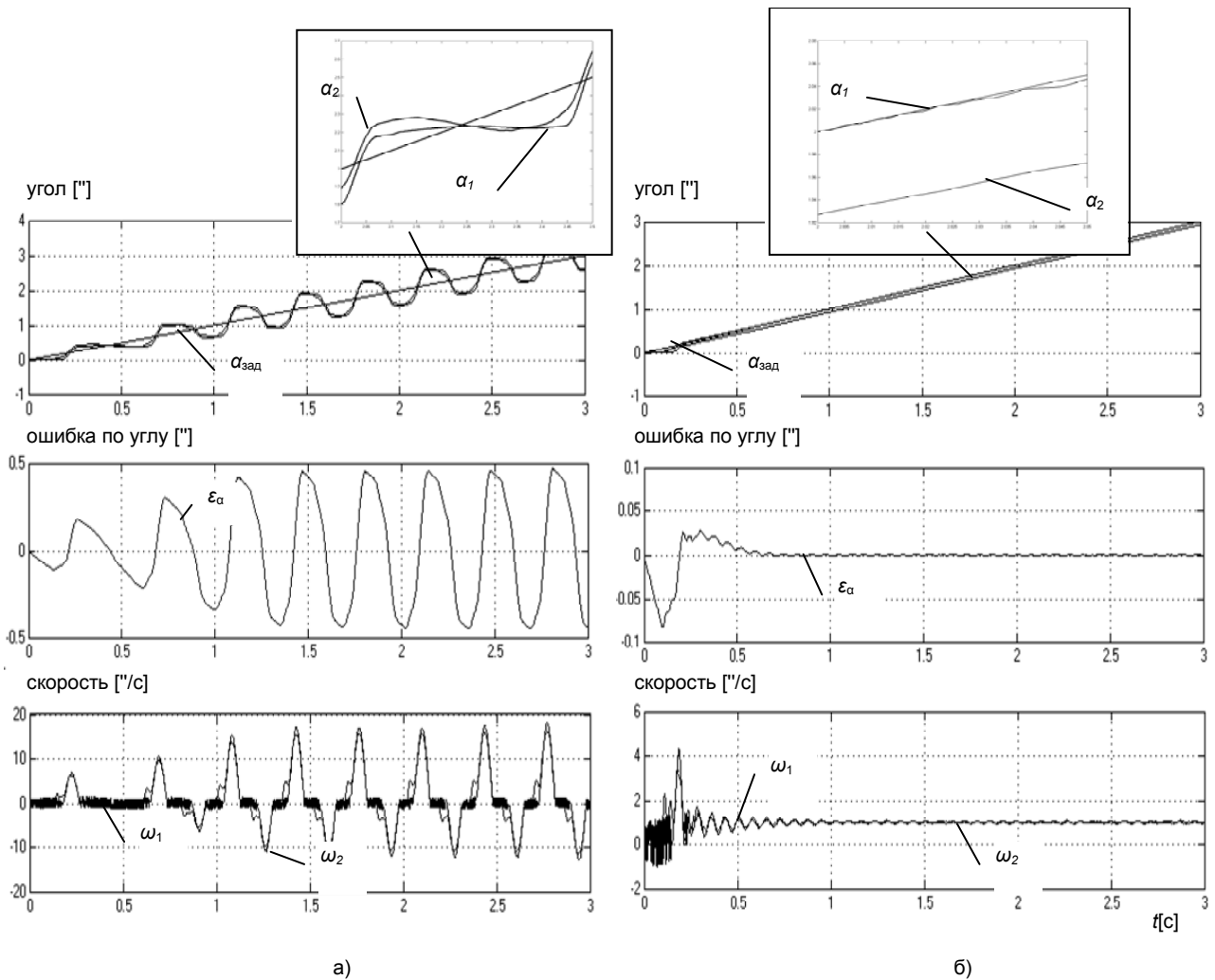


Рис. 3. Отработка сигнала задания с постоянной скоростью 1°/с традиционной системой подчиненного регулирования (а) и системой с эталонной моделью в контуре угла (б)

Заключение

Предложенная структура с эталонной моделью в контуре положения настроена на уменьшение автоколебаний и устранение «шагающего» режима при максимальном быстродействии системы. Уникальность предложенного метода настройки систем управления заключается в том, что можно получить желаемую передаточную функцию не только по задающему воздействию, но и по возмущающему. Благодаря данной настройке была существенно снижена ошибка слежения и расширена нижняя граница скоростей. Данная система управления используется в прецизионных следящих электроприводах с нежесткими осями, в опорно-поворотных устройствах телескопов траекторных измерений.

Список литературы

1. **Электропривод** с вентильными двигателями: Докл. науч.-практич. семинара. – М.: Изд. дом МЭИ, 2007.
2. **Томасов В.С., Овчинников И.Е., Егоров А.В.** Энергоподсистема большого алтайского телескопа траекторных измерений // Известия тульского государственного университета. – 2010. – Вып. 3. – Ч. 3. – С. 216–222.
3. **Балковой А.П., Цаценкин В.К.** Прецизионный электропривод с вентильными двигателями. – М.: Изд. дом МЭИ, 2010.
4. **Стещенко Е.В.** Адаптивная компенсация сухого и вязкого трения в системах автоматического управления // Вестник ЧитГУ. – 2008. – Т. 48. – № 3. – С. 123–128.
5. **Толмачев В.А.** Синтез следящего электропривода оси опорно-поворотного устройства // Изв. вузов. Приборостроение. – 2008. – Т. 51. – № 6. – С. 68–72.
6. **Ключев В.И.** Теория электропривода: учеб. для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1997.
7. **Денисов К.М., Жданов И.Н.** Оптимизация каналов скорости и положения прецизионных следящих электроприводов // Изв. вузов. Приборостроение. – 2008. – Т. 51. – № 6. – С. 45–51.

Работа выполнена при финансовой поддержке Федерального агентства по образованию по НИР НК-430П ГК №П2479 от 19.11.2009 г. (мероприятие №1.2.2) по направлению «Многофункциональное приборостроение для промышленных систем управления» по проблеме «Разработка систем управления движением прецизионных электроприводов приборных комплексов нового поколения» в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009-2013 г».

Демидова Галина Львовна,

Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики,
ассистент кафедры электротехники и прецизионных электромеханических систем,
телефон (812)233-83-36,
e-mail: demidofffa@mail.ru

Ловлин Сергей Юрьевич,

Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики,
аспирант кафедры электротехники и прецизионных электромеханических систем,
e-mail: s.lovlin@ets.ifmo.ru

Цветкова Мадина Хасановна,

Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики,
аспирант кафедры электротехники и прецизионных электромеханических систем,
телефон (812)233-83-36,
e-mail: madina1986@bk.ru