

УДК 681.5.621.3.07

ДВУХДВИГАТЕЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ УГЛОМЕСТНОЙ ОСЬЮ ДВУХАПЕРТУРНОГО ПРЕЦИЗИОННОГО ТЕЛЕСКОПА

В.Н. Дроздов^а, К. Завирски^б, А.А. Плотичин^а

^а Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

^б Познанский политехнический университет. Институт управления и информационной техники, Познань, 60965, Польша

Адрес для переписки: andreploticin@gmail.com

Информация о статье

Поступила в редакцию 24.11.14, принята к печати 12.02.15

doi:10.17586/2226-1494-2015-15-2-253-259

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Дроздов В.Н., Завирски К., Плотичин А.А. Двухдвигательное управление угломестной осью двухапертурного прецизионного телескопа // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Том 15. № 2. С. 253–259

Аннотация

Предмет исследования. Рассматривается система управления четырехмассовым объектом (двухапертурным телескопом) с двухдвигательным управлением.

Метод. Для упрощения системы управления используется возможность редуцирования модели объекта до третьего порядка. Выполняется синтез алгоритма контроллера по редуцированной модели, исследуются свойства системы, состоящей из четырехмассового объекта с двухдвигательным приводом и полученным регулятором. Синтез управления выполнен на основании модифицированного оптимального управления с гарантированной степенью устойчивости. Реализация закона управления осуществляется с применением наблюдателя пониженной размерности ввиду возможности измерения лишь одного параметра объекта управления – скорости одной из масс. Устойчивость системы проверяется путем изменения параметров объекта управления в 10%-ном диапазоне.

Основные результаты. В случае использования однодвигательного привода возможно построение регулятора только на основе модели медленных движений объекта. Быстродействие регулятора в таком случае ограничено наименьшей резонансной частотой объекта управления. Численное моделирование показало, что время переходного процесса системы с однодвигательным приводом в несколько раз больше, чем в системе с двухдвигательным приводом. Свойства робастности сохраняются как для однодвигательного, так и для двухдвигательного приводов. Для многомассовых объектов двухдвигательное управление обеспечивает более высокие показатели качества системы.

Практическая значимость. Результаты работы могут быть использованы при проектировании систем управления сложными электромеханическими устройствами с упругими связями, такими как исполнительные оси телескопов.

Ключевые слова: четырехмассовый объект, двухапертурный телескоп, ганкелевы сингулярные числа, двухдвигательный привод, алгоритм контроллера.

TWO-MOTOR ELEVATION DRIVE OF THE PRECISION TWIN TELESCOPE

V.N. Drozdov^а, K. Zawirski^б, A.A. Plotitsyn^а

^а ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

^б Poznan University of Technology. Institute of Control and Information Engineering, Poznan, 60965, Poland

Corresponding author: andreploticin@gmail.com

Article info

Received 24.11.14, accepted 12.02.15

doi:10.17586/2226-1494-2015-15-2-253-259

Article in Russian

For citation: Drozdov V.N., Zawirski K., Plotitsyn A.A. Two-motor elevation drive of the precision twin telescope. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2015, vol.15, no. 2, pp. 253–259. (in Russian)

Abstract

Subject of research. Control system of a four-mass object (twin telescope) with dual motor drive is considered.

Method. The reducing ability of an object model to the third order is used for simplification of control system. The synthesis of a discrete controller algorithm is completed based on the reduced model of the object. Characteristics of the system which consists of four-mass object with dual motor drive and obtained regulator are investigated. Control synthesis based on the modified design method of an optimal control with guaranteed degree of stability is used. Reduced-order observer is used in the control system since only one parameter of the plant can be measured — angular velocity of one lumped inertia. System robustness is verified by changing the nominal parameters of the plant in 10% range.

Main results. In case of using a single motor drive a regulator can be built only on the basis of the model of object slow motions. System performance (bandwidth) should be enough low not to excite elastic vibrations. Control rate then is limited

by the lowest resonating frequency of the plant. Numerical simulation reveals that transition time of the system with single motor drive significantly exceeds transition time of the system with dual motor drive. Both systems maintain the properties of robustness with changing parameters of the plant in all range. The usage of the dual motor drive is preferable when high qualitative indicators are required.

Practical relevance. The results can be used in the control systems design of the complex electromechanical mechanisms with elastic couplings such as telescope main drive axis.

Keywords: four-mass object, twin telescope, Hankel singular values, dual motor drive, controller algorithm.

Введение

Разнообразие задач, решаемых системой контроля космического пространства, влечет за собой разработку и изготовление все новых типов телескопов. Существенное место в инструментарии системы контроля космического пространства занимают оптические двухапертурные телескопы. С усложнением конструкции телескопов все в большей степени проявляется влияние упругости его элементов. Динамические свойства упругих конструкций описываются уравнениями в частных производных. Однако в инженерной практике широко распространено представление упругих конструкций сосредоточенными массами с гибкими соединениями [1, 2]. Такое представление упругих конструкций позволяет описывать их динамику линейными дифференциальными уравнениями. Особенность получающихся при этом моделей состояния и передаточных функций заключается в том, что они имеют нули [3–5]. Наличие нулей вносит определенные особенности в управление подобными объектами. Эти особенности полезно учитывать уже на этапе выбора привода телескопа. Интерес представляет, в частности, сравнение однодвигательного привода и привода многодвигательного [6, 7].

Модель объекта управления

Рассмотрим с указанных позиций управление угломестной осью двухапертурного оптического телескопа, расчетная схема которого приведена на рис. 1. На этом рисунке M_1, M_2 – моменты электродвигателей при двухдвигательном управлении, J_1, J_2, J_3, J_4 – моменты инерции четырех масс. В случае однодвигательного управления остается только один, в два раза больший, момент. Математическую модель объекта получим, пренебрегая переходными процессами в блоке питания и обмотках управления двигателей. В этом случае момент двигателя постоянного тока вычисляется согласно выражению

$$M = c_m i = c_m \frac{u - c_e \omega}{R} = a u - b \omega, \quad a = \frac{c_m}{R}, \quad b = \frac{c_e c_m}{R}.$$

Здесь c_m [Н·м/А] – коэффициент передачи (крутизна) по току; c_e [В·с/рад] – коэффициент передачи (крутизна) по угловой скорости; R [Ом] – активное сопротивление обмотки двигателя; u [В] – напряжение питания; ω [рад/с] – угловая скорость.

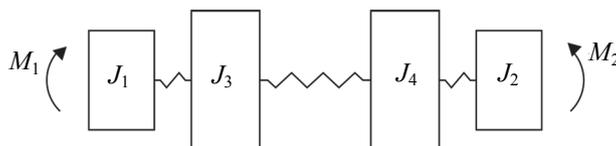


Рис. 1. Расчетная схема угломестной оси двухапертурного телескопа

Будем рассматривать также случай безредукторного соединения ротора двигателя с нагрузкой, в этом случае отсутствует люфт. Баланс моментов для первой массы:

$$M_1 = J_1 \frac{d\omega_1}{dt} + c_{13} \delta_{13} + M_{c1},$$

где c_{13} [Н·м / рад] – коэффициент упругости элемента соединения первой и третьей масс; $\delta_{13} = \alpha_1 - \alpha_3$ – угол закручивания элемента соединения первой и третьей масс; M_{c1} – момент сухого трения. С учетом выражения для вращающего момента двигателя система уравнений для первой массы будет иметь вид

$$\frac{d\omega_1}{dt} = -\frac{b_1}{J_1} \omega_1 - \frac{c_{13}}{J_1} \delta_{13} - \frac{1}{J_1} M_{c1} + \frac{a_1}{J_1} u_1,$$

$$\frac{d\delta_{13}}{dt} = \omega_1 - \omega_3.$$

Аналогичным образом составляются уравнения для остальных вращающихся масс объекта.

Система уравнений седьмого порядка, описывающая динамику объекта, выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} \dot{\omega}_1 = 1/J_1(-b_1\omega_1 - c_{13}\delta_{13} - M_{c1} + a_1u_1), \\ \dot{\delta}_{13} = \omega_1 - \omega_3 \\ \dot{\omega}_2 = 1/J_2(-b_2\omega_2 - c_{24}\delta_{24} - M_{c2} + a_2u_2), \\ \dot{\delta}_{24} = \omega_2 - \omega_4 \\ \dot{\omega}_3 = 1/J_3(-c_{34}\delta_{34} - M_{c3} + c_{13}\delta_{13}), \\ \dot{\delta}_{34} = \omega_3 - \omega_4 \\ \dot{\omega}_4 = 1/J_4(c_{34}\delta_{34} - M_{c4} + c_{24}\delta_{24}). \end{cases} \quad (1)$$

Представим полученную систему уравнений в виде стандартной модели состояния:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{V}_c\mathbf{M}_c, \\ \mathbf{y} &= \mathbf{C}\mathbf{x}. \end{aligned} \quad (2)$$

В этом выражении

$$\mathbf{x} = [\omega_1 \quad \delta_{13} \quad \omega_2 \quad \delta_{24} \quad \omega_3 \quad \delta_{34} \quad \omega_4]^T, \quad \mathbf{y} = \omega_1, \quad \mathbf{u} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{M}_c = [M_{c1} \quad M_{c2} \quad M_{c3} \quad M_{c4}]^T.$$

Матрицы модели состояния \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{V}_c , \mathbf{C} находятся из системы уравнений (1).

В случае использования одного двигателя в матрице \mathbf{A} коэффициент b_1 заменяется коэффициентом $b_3 = 2b_1$, $b_2 = 0$, а матрица входа имеет один столбец, $\mathbf{V}_1 = \begin{bmatrix} a_3 \\ J_1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}^T$, где $a_3 = 2a_1$.

Если в системе с двумя двигателями подавать одинаковое управление на оба двигателя, то матрица входа преобразуется к виду $\mathbf{V}_2 = \begin{bmatrix} a_1 & 0 & a_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$.

Будем исследовать двухапертурный телескоп, конструкция которого симметрична относительно азимутальной оси.

Номинальные параметры расчетной схемы телескопа равны:

$$\begin{aligned} J_1 = J_2 = 40 \text{ кг} \cdot \text{м}^2, \quad J_3 = J_4 = 500 \text{ кг} \cdot \text{м}^2, \quad c_{13} = c_{24} = 10^7 \text{ Н} \cdot \text{м/рад}, \quad c_{34} = 10^5 \text{ Н} \cdot \text{м/рад}, \\ a_1 = a_2 = 18 \text{ Н} \cdot \text{м/В}, \quad b_1 = b_2 = 504 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с/рад}, \quad a_3 = 36 \text{ Н} \cdot \text{м/В}, \quad b_3 = 1008 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с/рад}. \end{aligned}$$

Анализ объекта управления

Характерной особенностью моделей объектов с упругими связями является наличие нулей. Перспективным методом исследования динамических систем с нулями является использование ганкелева оператора [8–10]. Ганкелевы сингулярные числа системы характеризуют вклад собственных подпространств в преобразование пространства входных сигналов в пространство выходных сигналов. Чем меньше сингулярное число, тем меньший вклад соответствующего подпространства в преобразование входного сигнала в выходной, тем больше оснований для игнорирования соответствующего подпространства.

На рис. 2, а, приведены сингулярные числа для объекта управления при двухдвигательном приводе в случае подачи на оба двигателя одного и того же управления. На рис. 2, б, приведены сингулярные числа для объекта управления при однодвигательном приводе. Графики построены при номинальных параметрах механизма и электродвигателей. Явно прослеживается преимущество двухдвигательного привода перед однодвигательным. В двухдвигательном варианте четыре собственных подпространства практически не участвуют в передаче входного сигнала, в то время как в однодвигательном варианте все семь подпространств в равной степени участвуют в преобразовании входного сигнала в выходной.

Известно [11], что евклидова норма частотной характеристики системы равна

$$\|W(j\omega)\|_2 = \left(\int_0^\infty |W(j\omega)|^2 d\omega \right)^{\frac{1}{2}} = 0,5 \sum_i \sigma_i^2,$$

где σ_i – ганкелевы сингулярные числа системы. Согласно рис. 2, а, норма частотной характеристики редуцированной до третьего порядка модели рассматриваемого в настоящей работе объекта равна $\|W_r(j\omega)\|_2 = 0,5 \cdot 3 \cdot (0,018)^{0,5} = 0,2$. В то же время норма разности исходной частотной характеристики и

характеристики редуцированной системы $\|W(j\omega) - W_r(j\omega)\|_2 = 4,6 \cdot 10^{-9}$. Отсюда следует целесообразность редуцирования исходной модели до третьего порядка. Редуцирование модели объекта повлечет за собой уменьшение порядка регулятора состояния на четыре по сравнению с регулятором, необходимым для управления объектом седьмого порядка в случае использования однодвигательного привода.

Преимущество сохраняется и при отклонении значений параметров механизма и электродвигателей от номинальных, о чем можно судить по логарифмическим характеристикам объекта управления, приведенным на рис. 3.

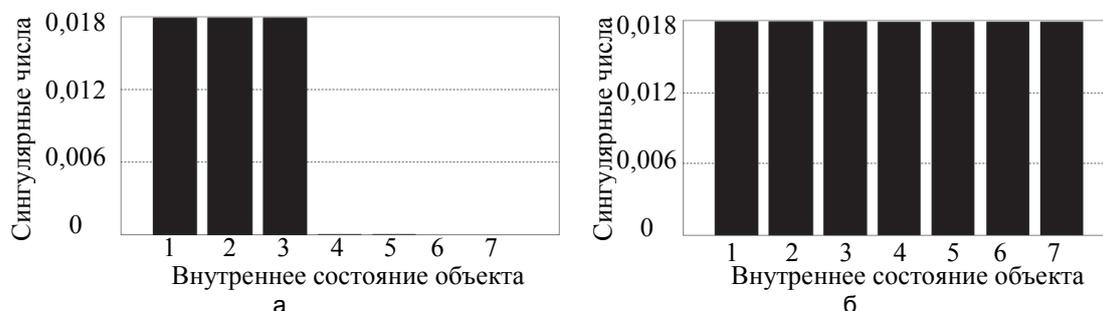


Рис. 2. Сингулярные числа объекта управления: при двухдвигательном управлении (а); при однодвигательном управлении (б)

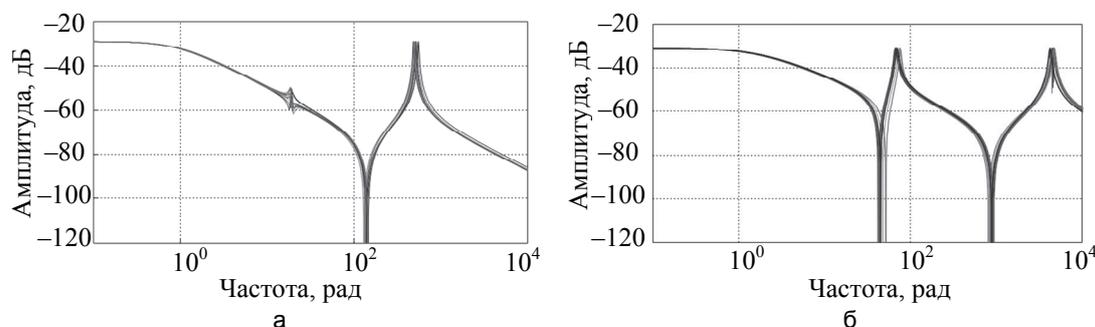


Рис. 3. Десять реализаций частотных характеристик при случайном изменении параметров механизма и двигателей в диапазоне $\pm 10\%$: при двухдвигательном управлении (а); при однодвигательном управлении (б)

Воспользуемся возможностью понижения порядка модели в случае двухдвигательного привода. Процедура редуцирования модели (2) до третьего порядка в пакете MATLAB осуществляется следующим образом. Формируется модель состояния объекта

$$S2=ss(A,B2,C,0).$$

На основании этой модели при помощи одного из возможных операторов MATLAB рассчитывается редуцированная модель третьего порядка, и находятся матрицы редуцированной модели состояния:

$$Sr=balancmr(S2,3); [Ar, Br, Cr, Dr]=ssdata(Sr).$$

Синтез цифрового управления

Как и в исходной модели, выходной величиной редуцированной модели является угловая скорость ω_1 первой массы. В действительности в системах слежения замыкание осуществляется по углу поворота, вместо датчика угловой скорости используется датчик угла поворота. По этой причине необходимо дополнить редуцированную модель интегратором. Матрицы модели состояния редуцированного объекта в этом случае будут иметь вид

$$A_{ra} = \begin{bmatrix} A_r & \mathbf{0}_{3 \times 1} \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix}, B_{ra} = \begin{bmatrix} B_r \\ 0 \end{bmatrix}, C_{ra} = [\mathbf{0}_{1 \times 3} \quad 1]. \quad (3)$$

В современном телескопостроении используется исключительно компьютерное управление. Для получения в явном виде алгоритма контроллера целесообразно от аналоговой модели (3) перейти к дискретной [12]:

$$\begin{aligned} x_{m+1} &= A_{rd} x_m + B_{rd} u_m, \\ y_m &= C_{rd} x_m. \end{aligned} \quad (4)$$

Матрицы дискретной модели в MATLAB вычисляются следующим образом. Формируется модель состояния объекта (3)

$$Sra=ss(Ara,Bra,Cra,0),$$

затем задается интервал дискретности контроллера и вычисляется дискретная модель состояния объекта (т.е. матрицы состояния A_{rd} , B_{rd} , C_{rd}):

$$T=0.001; Srd=c2d(Sra,T); [Ard, Brd, Crd, Drd]=ssdata(Srd).$$

В системах слежения за космическими объектами изменение координат целей, как правило, аппроксимируется кусочно-линейными функциями. При линейных входных воздействиях в системе управления необходимо иметь астатизм второго порядка для обеспечения нулевой установившейся ошибки. Объект управления (3) имеет в своем составе один интегратор. Для придания системе астатизма второго порядка введем в регулятор сумматор – дискретный интегратор [13]

$$z_{m+1} = z_m - y_m + g_m.$$

Дискретная модель нового объекта управления, состоящего из объекта (4) и сумматора, будет иметь вид

$$x_{m+1} = A_{rd}x_m + B_{rd}u_m,$$

$$z_{m+1} = z_m - C_{rd}x_m + g_m,$$

$$y_{om} = \begin{bmatrix} C_{rd}x_m \\ z_m \end{bmatrix}.$$

Матрицы модели состояния этого объекта

$$A_{o2} = \begin{bmatrix} A_{rd} & \mathbf{0}_{8 \times 1} \\ -C_{rd} & 1 \end{bmatrix}, B_{o2} = \begin{bmatrix} B_{rd} \\ 0 \end{bmatrix}, C_{o2} = \begin{bmatrix} C_{rd} & 0 \\ \mathbf{0}_{1 \times 8} & 1 \end{bmatrix}.$$

Для полученного объекта производится синтез цифрового регулятора состояния. В основе регулятора лежит идея модифицированного оптимального в смысле квадратичного функционала управления с заданной степенью устойчивости [14, 15].

На рис. 4, а, и 5, а, представлены результаты моделирования системы с двумя двигателями, состоящей из аналогового объекта (2) и дискретного регулятора четвертого порядка, в среде Simulink.

На рис. 4, а, приведен график переходного процесса в системе с двумя двигателями при слежении за линейно возрастающим воздействием со скоростью 1 град/с при номинальных параметрах механизма и электродвигателей. Максимальное значение ошибки не превосходит 45 угл. с, время переходного процесса 0,4 с.

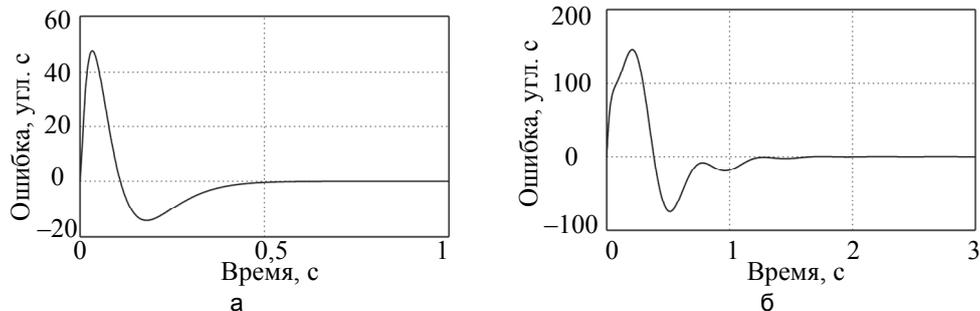


Рис. 4. Переходной процесс при отслеживании линейного задания со скоростью 1 град/с: двухдвигательное управление (а); однодвигательное управление (б)

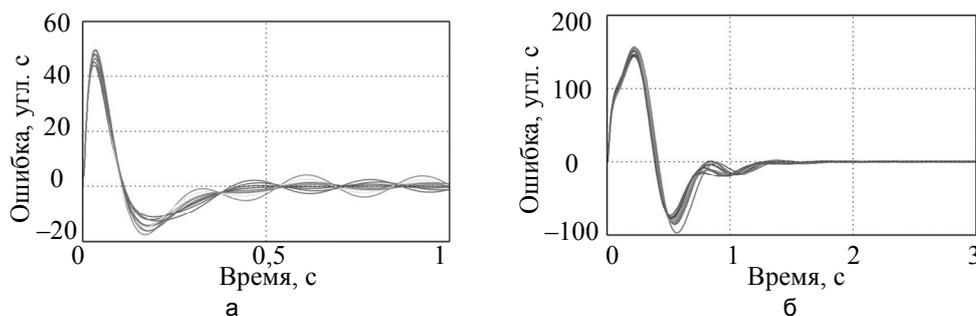


Рис. 5. Реализации переходного процесса при случайном изменении параметров объекта управления: двухдвигательное управление (а); однодвигательное управление (б)

На рис. 5, а, приведено 10 реализаций переходного процесса для того же входного сигнала, что и в предыдущем случае, при случайном изменении параметров механизма и двигателей в диапазоне $\pm 10\%$ от номинальных значений. Дискретный регулятор, синтезированный с использованием редуцированной модели, обеспечивает приемлемое с практической точки зрения сохранение качества системы при указанном диапазоне изменения параметров системы.

Попытка увеличить быстродействие системы за счет увеличения гарантированной степени устойчивости η [13] приводит к возбуждению системы при случайных изменениях параметров объекта в диапазоне $\pm 10\%$ от номинальных значений.

В случае использования одного двигателя для управления двухапертурным телескопом не удается получить такого быстродействия, которое достижимо в двухдвигательном варианте. Один двигатель – один источник момента – не в состоянии демпфировать несколько резонансных колебаний. Возможно только такое управление, которое не ведет к возбуждению высокочастотных колебаний механизма. Регулятор может обеспечивать только управление медленным движением объекта, т.е. управление эквивалентным одностепенным объектом с условием, чтобы высокочастотные колебания, определяемые упругими свойствами объекта, не возбуждались. Выделение медленной подсистемы, в рассматриваемом случае она имеет первый порядок, в MATLAB осуществляется следующей командой:

[Sr S12]=slowfast(S1,1).

В этой команде S1 – модель состояния двухапертурного телескопа с однодвигательным приводом; Sr – модель состояния эквивалентной одностепенной модели; S12 – модель состояния быстрой подсистемы, описывающей высокочастотные упругие колебания.

После получения модели Sr синтез регулятора осуществляется аналогичным образом, как и для двухдвигательного варианта.

На рис. 4, б, и 5, б, представлены результаты моделирования системы с одним двигателем, состоящей из аналогового объекта (2) и дискретного регулятора второго порядка в среде Simulink.

На рис. 4, б, приведен график переходного процесса в системе с одним двигателем при слежении за линейно возрастающим воздействием со скоростью 1 град/с при номинальных параметрах механизма и электродвигателя. Попытка увеличить быстродействие системы за счет увеличения η приводит к возбуждению системы при номинальных параметрах. Длительность переходного процесса в однодвигательной системе в 3 раза больше, чем в двухдвигательной. Максимальная ошибка во время переходного процесса также примерно в 3 раза больше, чем в однодвигательном варианте.

Робастность по отношению к качественным показателям исследовалась методом статистических испытаний при случайном изменении параметров механизма и двигателя в диапазоне $\pm 10\%$ от номинальных значений. Для каждого варианта выполнялось по тысяче опытов. На рис. 5 приведено по 10 реализаций переходного процесса для каждого варианта управления. Дискретный регулятор, синтезированный с использованием эквивалентной одностепенной модели, и в этом случае обеспечивает приемлемое с практической точки зрения сохранение качества системы при указанном диапазоне изменения параметров системы.

Свойства робастности по отношению к качественным показателям системы сохраняются как для однодвигательного, так и для двухдвигательного приводов.

Заключение

В работе сравниваются два варианта построения системы управления четырехмассовым объектом с жесткими связями. При построении двухдвигательного управления предложено синтезировать регулятор на основе редуцированной модели исследуемого объекта. Использование двухдвигательного привода обеспечивает трехкратное уменьшение как времени переходного процесса, так и максимальной ошибки во время переходного процесса.

В случае повышенных требований к качественным показателям систем управления многомассовыми объектами предпочтительнее двухдвигательное управление.

Литература

1. Zhao S., Gao Z. An active disturbance rejection based approach to vibration suppression in two-inertia systems // Asian Journal of Control. 2010. V. 15. N 2. P. 350–362. doi: 10.1002/asjc.552
2. Gao Z., Zang Y., Wu D. Analysis on parameter sensitivity and dynamic response of the mill drive system // Proc. Int. Conf. on Electrical and Control Engineering (ICECE 2011). Yichang, China, 2011. P. 3828–3832. doi: 10.1109/ICECENG.2011.6057074
3. Szolc T., Konowrocki R., Michajlow M., Pregowska A. An investigation of the dynamic electromechanical coupling effects in machine drive systems driven by asynchronous motors // Mechanical Systems and Signal Processing. V. 49. N 1–2. P. 118–134. doi: 10.1016/j.ymssp.2014.04.004
4. My F., Akmeliawati R., Wijaya A. Improved NCTF control method for a two mass point-to-point positioning system // Proc. Int. Conf. on Intelligent and Advanced Systems (ICIAS 2010). Kuala Lumpur, Malaysia,

2010. Art. 5716215. doi: 10.1109/ICIAS.2010.5716215
5. Zirn O., Katthan L., Olbrich M., Freyhardt S. Vibration damping and automatic commissioning of miniature servo drives with flexible load // Proc. 7th IET Int. Conf. on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2014). Manchester, UK, 2014. V. 2014. N 628 CP. doi: 10.1049/cp.2014.0270
 6. Xu F., Shi L. Characteristics analysis of multiple in-wheel induction-motors drive system // Proc. IEEE Int. Conf. on Industrial Technology. Auburn, USA, 2011. Art. 5754358. P. 121–126. doi: 10.1109/ICIT.2011.5754358
 7. Глазунов В.Ф., Лебедев С.К., Гнездов Н.Е. Разработка и исследование многодвигательных систем электроприводов переменного тока с нежесткой механикой // Вестник ИГЭУ. 2005. № 3. С. 1–6.
 8. Kumar D., Nagar S.K. Improved results on frequency weighted optimal Hankel norm model reduction // Proc. 9th Asian Control Conference (ASCC 2013). Istanbul, Turkey, 2013. Art. 6606397. doi: 10.1109/ASCC.2013.6606397
 9. Chaniotis D., Pai M. Model reduction in power systems using Krylov subspace methods // IEEE Transactions on Power Systems. 2005. V. 20. N 2. P. 888–894. doi: 10.1109/TPWRS.2005.846109
 10. Glover K. All optimal Hankel-norm approximations of linear multivariable systems // International Journal of Control. 1984. V. 39. N 6. P. 1115–1193.
 11. Zhou K., Doyle J.C. Essentials of Robust Control. Prentice Hall, 1998. 411 p.
 12. Astrom K.J., Murray R.M. Feedback Systems: An Introduction for Scientists and Engineers. Princeton: Princeton University Press, 2008. 424 p.
 13. Advances on Analysis and Control of Vibrations. Theory and Applications / Eds. M. Zapateiro de la Hoz, F. Pozo. InTech, 2012. 278 p.
 14. Abdullin A., Drozdov V., Plotitsyn A. Modified design method of an optimal control system for precision motor drive // WSEAS Transactions on Systems and Control. 2014. V. 9. N 1. P. 652–657.
 15. Абдуллин А.А., Дроздов В.Н., Плотичын А.А. Синтез оптимального управления прецизионным электроприводом с гарантированной степенью устойчивости // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2014. № 3 (91). С. 46–51.

- Дроздов Валентин Нилович*** – доктор технических наук, профессор, профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, drozdovuprint@rambler.com
- Завирски Кристоф*** – доктор наук, профессор, заведующий отделением, Познанский политехнический университет. Институт управления и информационной техники, Познань, 60965, Польша, zawirski@sol.put.poznan.pl
- Плотичын Андрей Андреевич*** – аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, andreiploticin@gmail.com
- Valentin N. Drozdov*** – D.Sc., Full Professor, Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, drozdovuprint@rambler.com
- Krzysztof Zawirski*** – D.Sc., Professor, Division Supervisor, Poznan University of Technology. Institute of Control and Information Engineering, Poznan, 60965, Poland, zawirski@sol.put.poznan.pl
- Andrei A. Plotitsyn*** – postgraduate, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, andreiploticin@gmail.com