

УДК 681.513.685

А. Е. Казурова, канд. техн. наук

### ВЫСОКОТОЧНОЕ УПРАВЛЕНИЕ МНОГОМАССОВОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОЙ УПРУГОЙ СИСТЕМОЙ

**Аннотация.** Показано, что с помощью комбинированного управления с наблюдателем неопределенности систему управления с неопределенным упругим многомассовым объектом можно расщепить на подсистемы, связанные между собой только через компенсируемый вектор неопределенности. Построение всей системы управления сводится к независимой разработке систем управления каждым звеном.

**Ключевые слова:** высокоточное управление, многомассовый объект, робастность, комбинированное управление, наблюдатель неопределенности, упругая система

A. Kazurova, PhD.

### HIGH-PRECISION CONTROL OF MULTIMASS UNCERTAIN ELASTIC SYSTEM

**Abstract.** It is shown that using a combined control with uncertainty observer the control system with uncertain elastic multimass object can be split into subsystems, which are interconnected only through compensated uncertainty vector. Construction of the entire control system is reduced to the independent design of each link control systems.

**Keywords:** high-precision control, multimass object, robustness, combined control, uncertainty observer, elastic system

А. Є. Казурова, канд. техн. наук

### ВИСОКОТОЧНЕ КЕРУВАННЯ БАГАТОМАСОВОЮ НЕВИЗНАЧЕНОЮ ПРУЖНОЮ СИСТЕМОЮ

**Анотація.** Показано, що за допомогою комбінованого керування зі спостережником невизначеності систему керування з невизначеним пружним багатомасовим об'єктом можна розщепити на підсистеми, пов'язані між собою тільки через вектор невизначеності, що компенсується. Побудова всієї системи керування зводиться до незалежної розробки систем керування кожною ланкою.

**Ключові слова:** высокоточне керування, багатомасовий об'єкт, робастність, комбіноване керування, спостережник невизначеності, пружна система

**Введение.** Постоянное ужесточение требований к количеству и качеству выпускаемой продукции приводит к необходимости увеличения точности и быстродействия управления различными объектами (транспорт, научные исследования, космические аппараты (КА), обрабатывающие станки, системы прицеливания стрелкового оружия, в том числе и на подвижном основании). Расширение областей автоматизации приводит к появлению всё более неопределённых (менее детерминированных) многомассовых объектов управления (ОУ). Под неопределёнными многомассовыми объектами понимаются составные ОУ с неизвестными массово-инерционными характеристиками, с не полностью и не точно известным вектором состояния, подверженные неизвестным внешним и внутренним воздействиям, а также с не точно известным управляющим воздействием.

Одним из самых сложных ОУ является многозвенный (многомассовый) робот. Структуры многих ОУ являются частными случаями структуры робота. Анализ показал, что наибольшими возможностями обеспечения высокой точности управления в условиях нелинейности и неопределённости, в том числе и при наличии нелинейного трения любого типа, обладает комбинированный метод управления с наблюдателями вектора неопределённости [1]. Причем, данный метод управления не требует точного знания

математической модели трения. При всем разнообразии технологических, транспортных систем, КА, систем вооружения в них можно выделить однотипные блоки. Одним из самых распространенных блоков является двухмассовая упругая подсистема. Эта подсистема состоит из электродвигателя (первая масса), управляющего через упругую трансмиссию поворотом рабочего органа (второй массой). В обрабатывающих станках описанный блок входит в системы управления шпинделем и подачей инструментов, в работах это подсистема поворота звена робота относительно станины или звена, к которому прикреплено рассматриваемое звено. Радиолокаторы и системы прицеливания стрелкового оружия также содержат указанную двухмассовую подсистему. Работа данных подсистем во многих случаях осложнена наличием нелинейного трения и упругостью. В зависимости от назначения всей системы, упомянутая двухмассовая подсистема осуществляет управление скоростью или перемещением рабочего органа. В этих случаях влияние нелинейного трения проявляется по-разному (управление перемещением гораздо сложнее, чем управление скоростью). В работах [2, 3] представлен обзор математических моделей трения и известных методов компенсации его влияния на системы управления.

**Цель работы** – применение общей теории комбинированного робастного управления [4, 5] для независимого управления составляющими двухмассовыми упругими подсистемами многомассовой системы.

© Казурова А. Е., 2014

Постановка задачи. Запишем уравнения движения многомассового упругого объекта, в частности, робота. Наиболее удачной представляется следующая форма уравнений движения робота, полученная в работе [6],

$$M(x_1)\ddot{x}_1 + R(x_1, \dot{x}_1)\dot{x}_1 + C(x_1 - N^{-1}x_2) = g_1(x_1, \dot{x}_1, t); \quad (1)$$

$$M_m\ddot{x}_2 + N^{-1}C(N^{-1}x_2 - x_1) = C_m i + g_2(\dot{x}_2), \quad (2)$$

где  $x_1 \in R^n$  – вектор координат взаимного положения соседних звеньев;  $x_2 \in R^n$  – вектор углов поворота роторов приводов относительно звеньев, на которых установлены приводы;  $M(x_1)$  – неизвестная симметрическая положительно определенная матрица инерции звеньев с учетом масс и расположения приводов;  $R(x_1, \dot{x}_1)$  – неизвестная матрица кориолисовых и центробежных сил;  $g_1(x_1, \dot{x}_1, t)$  – неизвестный вектор внешних (в том числе и гравитационных) сил, включающий нелинейное трение;  $g_2(\dot{x}_2)$  – вектор нелинейного трения на двигателе;  $M_m$  – известная матрица моментов инерции роторов приводов;  $C$  – диагональная матрица жесткостей приводов;  $N$  – диагональная матрица коэффициентов передачи редукторов.

Работу электродвигателей постоянного тока с управлением по цепи якоря (а также асинхронных двигателей с векторным управлением при постоянстве модуля потокосцепления ротора) в векторно-матричной форме можно описать уравнением

$$L_i \dot{i} + R_r i + C_m \dot{x}_2 = u, \quad (3)$$

где  $R_r, L_i, C_m$  – неизвестные диагональные матрицы сопротивлений и индуктивностей якорных цепей двигателей и коэффициентов электродвигателей;  $i \in R^n$  – вектор токов якорных цепей двигателей;  $u \in R^n$  – вектор управляющих напряжений. Слагаемое  $C_m \dot{x}_2$  обусловлено противоЭДС двигателя.

**Материалы исследования.** В работе [4] показано, что применение комбинированного метода управления с наблюдателем неопределенности позволяет расщепить полную задачу управления неопределенным нелинейным нестационарным многозвенным ОУ с жесткими связями, который описывается матричным дифференциальным уравнением второго порядка, на независимое управление каждым звеном и гарантирует полную компенсацию неопределенности и заданные показатели качества переходных процессов. Аналогичным образом, как это было проделано в работе [4], осуществим декомпозицию матричного дифференциального уравнения (1). Для этого вводится обозначение

$$M = M_0 + M_\delta, \quad (4)$$

где  $M_0$  – известная диагональная матрица инерции;  $M_\delta$  – матрица неизвестных отклонений. Подстановка выражения (4) в уравнение (1) дает

$$M_0 \ddot{x}_1 + C(x_1 - N^{-1}x_2) = g_\Sigma, \quad (5)$$

где

$$g_\Sigma = g_1 - M_\delta \ddot{x}_1 - R \dot{x}_1 \quad (6)$$

– вектор, в который собраны все отклонения от номинальных значений, нелинейности, нестационарности, нежелательные внутренние перекрестные связи, внешние возмущения и нелинейное трение.

В уравнениях (2), (3), (5) все матрицы являются диагональными, то есть эти уравнения эквивалентны системам скалярных уравнений, независимой описывающих динамику каждой двухмассовой подсистемы. В уравнении (5) взаимосвязь динамики каждого звена осуществляется только посредством вектора  $g_\Sigma$ . Эта взаимосвязь будет скомпенсирована за счет применения комбинированного метода управления с наблюдателем неопределенности. Поэтому построение всей системы управления (СУ) сводится к независимой разработке систем управления каждым звеном.

Разработанный метод применен для системы стабилизации и наведения вооружения бронированной машины [5, 7–9], для управления главными приводами прокатных станов [10]. Результаты моделирования показали, что синтезированные алгоритмы управления обеспечивают высокую точность и быстродействие при обработке программных сигналов.

**Выводы.** Показано, что с помощью комбинированного управления с наблюдателем неопределенности систему управления с неопределенным многомассовым объектом с упругими связями между массами можно расщепить на подсистемы, связанные между собой только через компенсируемый вектор неопределенности (то есть, на независимые подсистемы). Каждая подсистема представляет собой двухмассовую систему с упругими связями между массами, которая состоит из электродвигателя, упругой трансмиссии и объекта управления. Такая двухмассовая подсистема, помимо робота, может входить в состав системы управления металлообрабатывающих станков, прокатных станов, радиолокаторов и многих других технических устройств.

#### Список использованной литературы

1. Potapenko E., (1995), Robust Control of a Robot *Journal of Computer and Systems Sciences International Publ.*, Vol. 32 (2), pp. 86 – 93.
2. Потапенко Е. М. Компенсация воздействия нелинейного трения на системы управления [Текст] / Е. М. Потапенко, А. Е. Казурова // Радиотехника. Информатика. Управление. – 2009. – № 2. – С. 134 – 143.
3. Потапенко Е. М. Математические модели трения и методы компенсации его влияния на системы управления [Текст] / Е. М. Потапенко, А. Е. Казурова // Вісник НТУ «ХПІ» – Харків : НТУ «ХПІ», 2010. – № 28. – С. 139 – 140.

4. Потапенко Е. М. Высокоточное управление неопределенными многосвязными объектами. Часть 1. Синтез и анализ алгоритмов управления [Текст] / Е. М. Потапенко, А. Е. Казурова // Кибернетика и вычислительная техника. – 2007. – Вып. 155. – С. 58 – 71.

5. Казурова А. Е. Возможные варианты построения высокоточных систем управления упругой неопределенной электромеханической системой [Текст] / А. Е. Казурова, Е. М. Потапенко // Электротехника и электроэнергетика. – 2009. – № 1. – С. 4 – 14.

6. Spong M.W., (1987), Modeling and Control of Elastic Joint Robots, *Transactions of the ASME: Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control Publ.*, Vol. 109 (4), pp. 310 – 319.

7. Казурова А. Е. Высокоточное позиционное управление двухмассовой электромеханической системой [Текст] / А. Е. Казурова // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Осроградського. – Кременчук : КДПУ : – 2008. – Вип. 4/2008 (51). – Ч. 1. – С. 53 – 57.

8. Потапенко Е. М. Высокоточное управление упругой электромеханической системой с нелинейным трением [Текст] / Е. М. Потапенко, А. Е. Казурова // Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. – 2008. – № 1 (21). – С. 118 – 125.

9. Казурова А. Е. Высокоточное позиционное управление упругой электромеханической системой с минимальным количеством датчиков [Текст] / А. Е. Казурова // Вісник НТУ “ХПІ”. – Харків : НТУ “ХПІ”. – 2008. – № 30. – С. 213 – 214.

10. Казурова А. Е. Робастное управление главными приводами прокатных станов [Текст] / А. Е. Казурова // Вісник НТУ “ХПІ”. – Харків : НТУ “ХПІ”. – 2013. – № 36 (1009). – С. 189 – 190.

Получено 14.07.2014

#### References

1. Potapenko E., (1995), Robust Control of a Robot *Journal of Computer and Systems Sciences International Publ.*, Vol. 32 (2), pp. 86 – 93.

2. Potapenko E.M., and Kazurova A.E. Kompensatsiya vozdeistviya nelineinogo treniya na sistemy upravleniya [Compensation of the Nonlinear Friction Action on the Control Systems], (2009), *Radioelektronika. Informatika. Upravlenie*, Zaporizhzhya, Ukraine, Vol. 2, pp. 134 – 143 (In Russian).

3. Potapenko E.M., and Kazurova A.E. Matematicheskie modeli treniya i metody kompensatsii ego vliyaniya na sistemy upravleniya [Mathematical Friction Models and Compensation Methods of Its Action on Control Systems], (2010), *Visnyk NTU “HPI”*, Kharkov, Ukraine, *Kharkov Nat. Techn. Univ. “Kharkov Polytechn. Inst.” Publ.*, Vol. 28, pp. 139 – 140 (In Russian).

4. Potapenko E.M., and Kazurova A.E. Vysokotochnoe upravlenie neopredelennymi mnogovsvyaznymi ob’ektami. Chast’ 1. Sintez i analiz algoritmov upravleniya [High-Precision Control of Uncertain Multilinked Objects. Part 1. Synthesis and Analysis of Control Algo-

rithms], (2007), *Kibernetika i Vychislitel’Naya Tekhnika*, Kiev, Ukraine, Vol. 155. pp. 58 – 71 (In Russian).

5. Kazurova A.E., and Potapenko E.M. Vozmozhnye varianty postroeniya vysokotochnykh sistem upravleniya uprugoi neopredelennoi elektromekhanicheskoi sistemoi [Possible Construction Variant of the High-Precision Control System of Flexible Uncertain Electromechanical System], (2009), *Elektrotekhnika and Elektroenergetika*, Zaporizhzhya, Ukraine, Vol. 1, pp. 4 – 14 (In Russian).

6. Spong M.W. Modeling and Control of Elastic Joint Robots, (1987), *Transactions of the ASME: Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control Publ.*, Vol. 109 (4), pp. 310 – 319.

7. Kazurova A.E. Vysokotochnoe pozitsionnoe upravlenie dvukhmassovoi elektromekhanicheskoi sistemoi [High-Precision Position Control of Two-Mass Electromechanical System], (2008), *Visnyk Kremenchuc’kogo Derzhavnogo Politeh, xnichnogo Universytetu imeni Myh, xajla Ostrograds’kogo*, Kremenchuk, Ukraine, *Kremenchuk St. Polytechn. Univ. Publ.*, Vol. 4/2008 (51), Iss. 1, pp. 53 – 57 (In Russian).

8. Potapenko E.M., and Kazurova A.E. Vysokotochnoe upravlenie uprugoi elektromekhanicheskoi sistemoi s nelineinym treniem [High-Precision Flexible Electromechanical System Control with Nonlinear Friction], (2008), *Avtomatika. Avtomatizatsiya. Elektrotekhnicheskie Kompleksy i Sistemy*, Kherson, Ukraine, Vol. 1(21), pp. 118 – 125 (In Russian).

9. Kazurova A.E. Vysokotochnoe pozitsionnoe upravlenie uprugoi elektromekhanicheskoi sistemoi s minimal’nym kolichestvom datchikov [High-Precision Position Control of Flexible Electromechanical System with Minimum Quantity of Sensors], (2008), *Visnyk NTU “HPI”*, Kharkov, Ukraine, *Kharkov Nat. Techn. Univ. “Kharkov Polytechn. Inst.” Publ.*, Vol. 30, pp. 213 – 214 (In Russian).

10. Kazurova A.E. Robastnoe upravlenie glavnymi privodami prokatnykh stanov [Robust Control of Rolling Mills Main Drivers], (2013), *Visnyk NTU “HPI”*, Kharkov, Ukraine, *Kharkov Nat. Techn. Univ. “Kharkov Polytechn. Inst.” Publ.*, Vol. 36(1009), pp. 189 – 190 (In Russian).



Казурова  
Алина Евгеньевна,  
канд. техн. наук, доц. каф.  
электропривода и автоматизации  
промышленных установок  
Запорожского нац. технического ун-та, ул. Жуков-  
ского, д. 64.  
г. Запорожье, 69063.  
E-mail: akazurova@gmail.com