

Б.И. КУЗНЕЦОВ, д-р техн. наук, проф., зав. отделом, НТЦ МТО
НАН Украины, Харьков

Т.Б. НИКИТИНА, канд. техн. наук, докторант, НТУ "ХПИ",
Харьков

А.В. ВОЛОШКО, аспирант, НТЦ МТО НАН Украины, Харьков

БУАКЛИН МОХАММЕД АЛИ, аспирант, НТУ "ХПИ", Харьков

СТОХАСТИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ЦИФРОВОГО РОБАСТНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ВЕРТИКАЛЬНОГО НАВЕДЕНИЯ

Розроблено метод стохастичного синтезу цифрового робастного керування електроприводом вертикального наведення з урахуванням пружних елементів як дискретно-континуальним об'єктом. Наведено приклад динамічних характеристик синтезованої системи.

Разработан метод стохастического синтеза цифрового робастного управления электроприводом вертикального наведения с учетом упругих элементов как дискретно-континуальным объектом. Приведен пример динамических характеристик синтезированной системы.

Введение. Многие объекты управления представляют собой протяженные конструкции, связывающие исполнительный двигатель с рабочим органом. Это, в частности, касается стрел подъемных кранов, рук антропоморфных роботов, стволов орудий и т.д. При управлении такими протяженными объектами необходимо учитывать собственные механические колебания, обусловленные упругими свойствами этих протяженных объектов управления.

Анализ последних достижений и публикаций по данной проблеме. В работах [1-8] рассмотрены вопросы параметрического синтеза систем наведения и стабилизации. В этих системах используется классическая структура регуляторов с жесткими обратными связями по сигналам с гироскопических датчиков углов и угловых скоростей, что ограничивает возможности получения высокой точности работы системы. В работах [5-7] рассмотрены вопросы синтеза систем наведения и стабилизации при условии отсутствия информации о внешних воздействиях. Системы наведения и стабилизации работают в условиях случайных внешних воздействиях, параметры которых хорошо изу-

чены, и, естественно, эту информацию целесообразно использовать при синтезе системы наведения и стабилизации.

В настоящее время интенсивно развивается теория стохастического робастного управления. Системы стохастического робастного управления обладают рядом преимуществ. Во-первых, они робастно устойчивы, т.е. сохраняют устойчивость при изменении параметров объекта управления в определенных пределах. Во-вторых, они имеют существенно меньшую чувствительность к изменению параметров объекта управления по сравнению с оптимальными системами, несмотря на то, что динамические характеристики стохастических робастных систем могут незначительно отличаться от соответствующих характеристик оптимальных систем. Трудность синтеза стохастической робастной системы заключается не в решении тех или иных уравнений, а, прежде всего, в формулировании критерия качества стохастического робастного управления таким образом, чтобы синтезированная система удовлетворяла техническим требованиям, предъявляемым к системе [8].

Цель работы. Целью данной работы является повышение точности системы наведения и стабилизации в вертикальной плоскости за счет применения анизотропийного робастного регулятора при случайных внешних сигналах. Задачей статьи является синтез и исследование динамических характеристик стохастической робастной системы наведения и стабилизации в вертикальной плоскости с учетом упругости объекта управления.

Постановка задачи. Рассмотрим математическую модель объекта управления системы наведения и стабилизации в вертикальной плоскости следуя работе [1,9]. Представим объект управления в виде твердого тела - и упругого элемента. Помимо вращения относительно оси, оно совершает упругие колебания. Обозначим через $\gamma(t)$ угол поворота жесткого тела в инерциальной системе координат, $y(x,t)$ - отклонение точек стержня от недеформированного состояния.

Предположим, что управление осуществляется с помощью стабилизирующего момента $M_{c0}(t)$, приложенного к основному жесткому телу. Возмущающий момент $M_{в0}(t)$ действует также относительно этой оси поворота основного жесткого тела.

Тогда уравнение движения башни относительно оси может быть записано в следующем виде [1]:

$$I_0 \ddot{\phi}(t) - \int_r^{r+l} m_1(x) \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} dx = M_{co}(t) + M_{bo}(t).$$

Это уравнение описывает свободное движение дискретно-континуального объекта управления, в котором I_c является характеристикой дискретно-континуального объекта как твердого тела, а $m_1(x)$ характеризует взаимное влияние движений жесткого модуля и колебаний упругих элементов. Функция $y(x,t)$ удовлетворяет уравнению колебаний упругой балки

$$m_1(x) \ddot{\phi}(t) + m(x) \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} + EI(x) \frac{\partial^4 y(x,t)}{\partial x^4} + \xi EI(x) \frac{\partial^5 y(x,t)}{\partial x^4 \partial t} = F_0(x,t),$$

где $EI(x)$ - изгибная жесткость ствола; ξ - коэффициент внутреннего демпфирования материала ствола; $F(x,t)$ - распределенное по длине ствола внешнее возмущение, обусловленное вертикальными колебаниями оси цапф орудия при движении танка по пересеченной местности.

Представим функцию $y(x,t)$ в виде следующего разложения

$$y(x,t) = \sum_{i=1}^n \gamma_i(t) T_i(t),$$

где n - число учитываемых форм упругих колебаний ствола. Тогда получим следующие уравнения, описывающие движение дискретно – континуального объекта под действием стабилизирующего момента $M_{co}(t)$, возмущающего момента $M_{bo}(t)$, а также распределенной по длине ствола силы $F_0(x,t)$, вызванной горизонтальными колебаниями подрессоренной части танка

$$I_0 \ddot{\phi}(t) - \sum_{i=1}^n \ddot{T}_i(t) \int_r^{r+l} m_1(x) \gamma_i(x) dx = M_{co}(t) + M_{bo}(t),$$

$$m_1(x) \ddot{\phi}(t) + m(x) \sum_{i=1}^n \gamma_i(x) \ddot{T}_i(t) + EI(x) \sum_{i=1}^n \gamma_i^{IV}(x) T_i(t) + \xi EI(x) \sum_{i=1}^n \gamma_i^V(x) \dot{T}_i(x) = F(x,t).$$

Учитывая только первую основную форму упругих колебаний, функцию $y(x,t)$ представим в виде

$$y(x,t) = \gamma_0(x) T_0(t).$$

Тогда уравнения динамики движения дискретно-континуального объекта управления примут следующий вид

Здесь введено обозначение $\Delta = I_0 c_0 + a_0^2$.

Метод решения. Рассмотрим задачу стохастической робастной оптимизации системы наведения и стабилизации в канале горизонтального наведения, минимизирующего анизотропийную норму в форме пространства состояний. Этот регулятор формирует управляющее воздействие на вход системы по ее измеряемому выходу и представляет собой динамический блок типа компенсатора, объединяющий робастный наблюдатель и робастный регулятор [10-14].

Обозначим A, B, C, D реализацию исходной системы, замкнутой этим динамическим блоком в следующем виде

$$\mathfrak{S}(w, w_{ky}) \sim \begin{bmatrix} \bar{A} & \bar{B} \\ \bar{C} & D_{11} \end{bmatrix} \equiv \left[\begin{array}{cc|c} A & B_2 \hat{C} & B_1 \\ \hline \hat{B} C_2 & \hat{A} & \hat{B} D_{21} \\ C_1 & D_{12} \hat{C} & D_{11} \end{array} \right].$$

Рассмотрим уравнение Риккати

$$R = \bar{A}^T R \bar{A} + q \bar{C}^T \bar{C} + L^T \Sigma^{-1} L,$$

$$\Sigma \equiv \left[I_{m_1} - q D_{11}^T D_{11} - \bar{B}^T R \bar{B} \right]^{-1},$$

$$L \equiv [L_1 \quad L_2] \equiv \Sigma \left[\bar{B}^T R \bar{A} + q D_{11}^T \bar{C} \right].$$

В этом уравнении скалярный параметр q выбирается из полуоткрытого интервала $\left[0; \left\| \mathfrak{S}(w, w_{ky}) \right\|_{\infty}^{-2} \right]$. Если это уравнение Риккати имеет решение, то анизотропия сигнала равна

$$-\frac{1}{2} \ln \det \left[\frac{m_1 \Sigma}{\text{tr} \{ L P L^T + \Sigma \}} \right] = a,$$

а эквивалентный формирующий фильтр

$$W_{\Phi} \sim \begin{bmatrix} \bar{A} + \bar{B} L & \bar{B} \Sigma^{1/2} \\ L & \Sigma^{1/2} \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{cc|c} A + B_1 L_1 & B_1 L_2 + B_2 \hat{C} & B_1 \Sigma^{1/2} \\ \hline \hat{B} [C_2 + D_{21} L_1] & \hat{A} + \hat{B} D_{21} L_2 & \hat{B} D_{21} \Sigma^{1/2} \\ L_1 & L_2 & \Sigma^{1/2} \end{array} \right]$$

имеет грамиан управляемости, определяемый уравнением Ляпунова

$$P = [\bar{A} + \bar{B} L] P [\bar{A} + \bar{B} L]^T + \bar{B} \Sigma \bar{B}^T.$$

При этом a - анизотропийная норма системы, замкнутой таким регулятором, равна

$$\| \mathfrak{S}(W, W_{ky}) \|_a = \left\{ \frac{1}{q} \left[1 - \frac{m_1}{\text{tr}[LPL^T + S]} \right] \right\}^{1/2}.$$

Рассмотрим уравнение Риккати

$$\begin{aligned} S &= [A + B_1 L_1] S [A + B_1 L_1]^T + B_1 \Sigma B_1^T - \Lambda \Theta \Lambda^T, \\ \Theta &\equiv [C_2 + D_{21} L_1] S [C_2 + D_{21} L_1]^T + D_{21} \Sigma D_{21}^T, \\ \Lambda &\equiv [A + B_1 L_1] S [C_2 + D_{21} L_1]^T + B_1 \Sigma D_{21}^T \Theta^{-1}. \end{aligned}$$

Рассмотрим также уравнение Риккати

$$T = \underline{A}^T T \underline{A} + \underline{C}^T \underline{C} - N^T \Pi N,$$

$$\Pi \equiv \underline{B}^T T \underline{B} + D_{12}^T D_{12},$$

$$N \equiv [N_1 \quad N_2] \equiv -\Pi^{-1} (\underline{B}^T T \underline{A} + D_{12}^T \underline{C}),$$

в котором матрицы A, B, C, D реализации имеют следующий вид

$$\begin{bmatrix} \underline{A} & \underline{B} \\ \underline{C} & \underline{D} \end{bmatrix} \equiv \left[\begin{array}{cc|c} A & B_1 M & B_2 \\ 0 & A + B_1 M + B_1 \widehat{C} & 0 \\ \hline C_1 & D_{11} M & \underline{D} \end{array} \right].$$

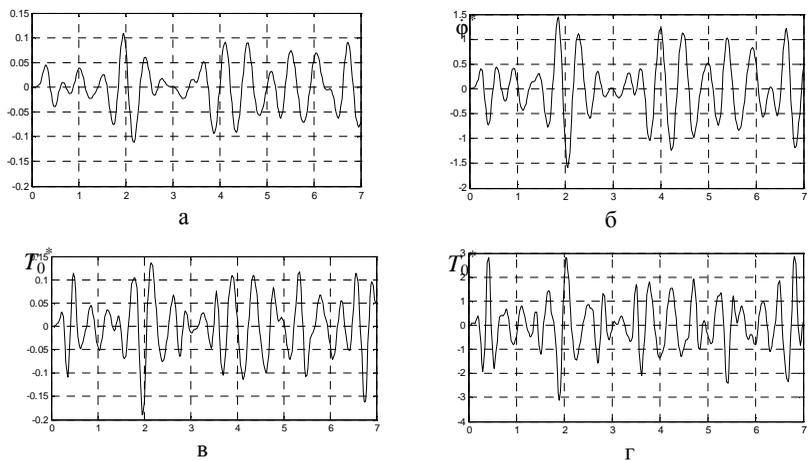
Откуда может быть получена $\widehat{A}, \widehat{B}, \widehat{C}, \widehat{D}$ реализация регулятора, оптимизирующего анизотропийную норму.

$$\widehat{A} = B_2 \widehat{C} + [I_n - \Lambda] \begin{bmatrix} A & B_1 \\ C_2 & D_{21} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_n \\ M \end{bmatrix},$$

$$\widehat{B} = \Lambda, \quad \widehat{C} = N_1 + N_2.$$

Таким образом, решение задачи стохастической робастной оптимизации сводится к вычислению трех алгебраических уравнений Риккати, уравнения Ляпунова и уравнения специального вида для вычисления уровня анизотропии входного сигнала.

Результаты моделирования. На рис. 1 показаны процессы изменения компонент вектора состояния замкнутой системы: а) угла $\varphi(k)$ отклонения между осью канала ствола и б) $\dot{\varphi}^*$ его производной; в) функции $T_0(k)$ и г) \dot{T}_0^* ее производной вертикального наведения при случайных внешних воздействиях при отработке системой случайного рассогласования между направлением башни и направлением на цель.



На рис.2. показаны процессы изменения компонент вектора состояния замкнутой системы а) момента стабилизации $M_{CO}(k)$ и б) \dot{M}_{CO}^* его производной; в) момента возмущения $M_{BO}(k)$ и г) $\dot{M}_{BO}(k)$ его производной вертикального наведения при случайных внешних воздействиях.

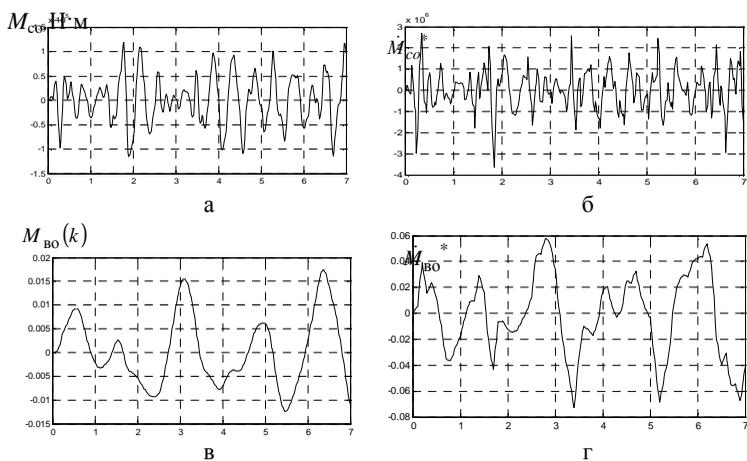


Рис.2.

Выводы из проведенного исследования, перспективы этого направления. Разработана методика синтеза стохастических робаст-

ных регуляторов для стабилизатора в вертикальной плоскости как дискретно-континуального объекта управления с учетом упругих колебаний ствола. Приведен пример динамических характеристик синтезированной системы.

- Список литературы:** 1. Александров Е.Е., Богаенко И.Н., Кузнецов Б.И. Параметрический синтез систем стабилизации танкового вооружения. – К.: Техніка, 1997. – 112 с. 2. Александров Е.Е., Кузнецов Б.И., Радиевский А.Е. Оптимизация электромеханических систем с упругими элементами. – Харьков: ІМІС, 1995. – 304 с. 3. Александров Е.Е., Александрова И.Е., Богаенко И.Н. Инвариантный стабилизатор основного вооружения танка // Артиллерийское и стрелковое вооружение. – Киев. – 2006. – №3. – С. 30 – 34. 4. Александров С.С., Богатыренко К.И., Беляев С.М. Параметричний синтез автоматизованого електропривода танкової башти. Електромашинобудування та електрообладнання. Міжвідомчий науково - технічний збірник. – Київ: Техніка. 2006. – Вип. 66. – С. 195 – 196. 5. Александров Е.Е., Александрова И.Е., Костяник И.В. Параметрический синтез стабилизатора переменной структуры дискретно-континуального объекта // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск. Силова електроніка та енергоефективність. Ч. 4. – Київ. – 2006. – С. 65-68. 6. Богатыренко К.И., Беляев С.Н., Савчук А.О. Инвариантный танковый стабилизатор основного вооружения. Механіка та машинобудування // Науково-технічний журнал. – Харьков: НТУ "ХПИ", 2006. – №1. – С. 229 – 232. 7. Нефедов А.В., Рудник Н.П. Определение параметров передаточных функций модели стабилизатора для тренажера боевого отделения танка. Механіка та машинобудування // Науково-технічний журнал. – Харьков: НТУ "ХПИ", 2004. – №2. – С. 185 – 192. 8. Корнеев В.В., Кузнецов М.И., Кузьмин Л.П. Основы автоматіки и танковые автоматические системы. – М.: АБТВ, 1976. – 546 с. 9. Кузнецов Б.И., Никитина Т.Б., Коломиец В.В. Синтез электромеханических систем со сложными кинематическими цепями. – Харьков: УИПА, 2005. – 511 с. 10. Khargonekar P., Petersen I., Rotea M. H^∞ optimal control with state feedback // IEEE Trans. Automat. Contr., 1988. – AC – 33. – P. 783-786. 11. Doyle J., Glover K., Khargonekar P, and Francis B. State-space solutions to standard H^2 and H^∞ control problems // IEEE Trans. Automat. Contr. – 1989. – AC – 34. – No 8. – P. 831-847. 12. Doyle J.C. Synthesis of Robust Controllers and Filters – Proc. IEEE Conf. On Decision and Control, San Antonio, TX, December 14 – 16, 1983. 13. Safonov M.G., Chiang R.Y. and Flashner H. H^∞ Control Synthesis for a Large Space Structure // AIAAJ. Guidance, Control and Dynamics, May/June 1991. – 14, 3. – P. 513-520. 14. Stein G. Lecture Notes, Tutorial Workshop on H^∞ Control Theory. – Los Angeles, CA, Dec. 7 – 8, 1987.



Кузнецов Борис Иванович, д.т.н., проф., заведующий отделом Научно-технического центра магнетизма технических объектов Национальной академии наук Украины. Защитил докторскую диссертацию в 1990 году по синтезу структур и оптимизации многоканальных квазиитерационных систем управления.



Никитина Татьяна Борисовна, к.т.н., докторант кафедры системного анализа и управления Национального технического университета "ХПИ", защитила кандидатскую диссертацию в 2001 году по синтезу систем управления главными электроприводами блюминга в режиме пробуксовки валков.



Волошко Александр Валерьевич, м.н.с. отдела проблем управления магнитным полем Научно-технического центра магнетизма технических объектов Национальной академии наук Украины.



Буаклин Мохаммед Али
Закончил Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт" в 2007 году по специальности "Электропривод и автоматизация промышленных установок". Аспирант кафедры "Колесных и гусеничных машин".

Поступила в редколлегию 15.06.2010