сосредоточено внимание ИКАО относятся:

• менеджмент процесса выдачи проездных документов;

• подтверждение защищенности проездных документов;

• инфраструктура открытых ключей (PKI) ИКАО в целом и в частности директория открытых ключей (PKD) [4].

Украинские ученые имеют определенный положительный опыт в разработке проблемных вопросов, связанных с инфраструктурой открытых ключей и мощную базу для создания новых механизм подтверждение защищенности проездных документов. Другие текущие задачи, требующие решения для развития системы машиносчитываемых проездных документов также могут быть решены с участием отечественных ученых. В то же время этот потенциал не используется в полном объеме. Исходя из этих положений, можно сделать вывод, что перспективные направления совершенствования системы электронных цифровых паспортов целесообразно исследовать украинским специалистам в области защиты информации. Кроме того очень важно иметь представителя в рабочих группах ИКАО для внедрения своих разработок и активного участия в международном процессе создания и совершенствования системы электронных цифровых паспортов.

Литература

1. Materials of sixth MRTD symposium and exhbition on ICAO MRTDs, biometrics and security standards, ICAO headquarters, Montréal, Canada 1 to 4 November 2010.

2. ICAO MRTD report volume 6, number 1, 2011.

3. ICAO MRTD report volume 6, number 2, 2011.

4. Materials of seventh MRTD symposium and exhbition on ICAO MRTDs, biometrics and security standards ICAO headquarters, Montréal, Canada 12 to 15 September 2011.

УДК 517.9:629.42

СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИМ ОБЪЕКТОМ

Дмитриенко В.Д., Заковоротный А.Ю. Нестеренко А.О

Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", Харьков, Украина, arcade@i.ua

Разработана система поддержки принятия решений для управления динамическим электромеханическим объектом. Основой системы является подсистема определения оптимальных управлений динамическим объектом средствами геометрической теории управления, использующей линеаризацию нелинейной модели объекта с помощью обратной связи в пространстве "вход – состояние".

Ключевые слова: динамический электромеханический объект, геометрическая теория управления, линеаризация, обратная связь в пространстве "вход – состояние".

DECISION OF SUPPORT SYSTEM FOR MANAGEMENT DYNAMIC OBJECTS

Dmitrienko V.D., Zakovorotnyi A.Yu., Nesterenko A.O.
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkov, Ukraine, arcade@i.ua

Developed decision support system for managing dynamic electromechanical object. The basis of system is a subsystem of determining optimal dynamic management object by means of geometric control theory, which uses linearization of the nonlinear model of object with the help of feedback in space "entry - state."

Keywords: dynamic electromechanical object, geometric control theory, linearization, the feedback in space "entry - state."

Постановка проблемы. Разработка современных систем поддержки принятия решений (СППР) – актуальная задача для многих человеко-машинных систем управления сложными динамическими объектами. Основой таких СППР часто является подсистема определения оптимальных управлений динамическим объектом. Существуют удобные методы, позволяющие выполнять синтез регуляторов для объектов, описываемых системами обыкновенных дифференциальных линейных уравнений. Однако, если модель объекта описывается системой дифференциальных нелинейных уравнений выше третьего – четвертого порядка и имеет несколько управлений, то синтез регуляторов существенно затрудняется. Попытки обойти эти трудности, путем линеаризации нелинейных систем в достаточно малой окрестности рабочей точки и применения теории линейных систем управления, для сложных объектов в большинстве случаев неприменимы. Однако хорошо разработанная теория линейных систем управления постоянно привлекает внимание специалистов по управлению нелинейными системами, что привело к разработке методов линеаризации на основе геометрических подходов с помощью обратной связи в пространстве "вход – состояние" или "вход – выход" [1, 2].

Задача определения эквивалентной линейной системы управления для нелинейной системы вида

$$\frac{dx}{dt} = F(x) + \sum_{k=1}^{m} u_k G_k(x), x \in M \subset R^n, \tag{1}$$

где $x = (x_1, x_2, ..., x_n)$ – вектор фазовых координат нелинейной системы управления на гладком многообразии M размерности n; $F(x)$, $G_k(x)$ – гладкие векторные поля на многообразии M, которые в локальных системах координат имеют вид $F(x) = \sum_{j=1}^{n} \varphi_j(x) \frac{\partial}{\partial x_j}$ и $G_k(x) = \sum_{j=1}^{n} \phi_{kj}(x) \frac{\partial}{\partial x_j}$; $\varphi_j(x)$, $\phi_{kj}(x)$ ($j = \overline{1,n}$) – гладкие функции векторного аргумента x, определенные в локальных системах координат на многообразии M; u_k ($k = \overline{1,m}$) – управления, может быть сформулирована следующим образам [2].

Необходимо найти такую гладкую замену координат $z = z(x)$, $z \in R^n$ и управлений $v = v(u, x)$, $v = (v_1, v_2, ..., v_m)$, $u = (u_1, u_3, ..., u_m)$, что система управления (1) приводится в новой системе координат к эквивалентной управляемой линейной системе

$$\frac{dz}{dt} = Az + Bv,\ z \in R^n,\ v \in R^m,\ \ m < n. \qquad (2)$$

Здесь матрицы A и B имеют соответственно размеры $n \times n$ и $n \times m$ и являются блочно-диагональными матрицами $A = \mathrm{blockdiag}[A_1, ..., A_p, ..., A_m]$, $B = \mathrm{blockdiag}[B_1, ..., \ \ B_p, ..., B_m]$, где

$$A_p = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 & ... & 0 \\ 0 & 0 & 1 & ... & 0 \\ ... & ... & ... & ... & ... \\ 0 & 0 & 0 & ... & 1 \\ 0 & 0 & 0 & ... & 0 \end{vmatrix}_{q_p \times q_p}; \quad B_p = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ ... \\ 0 \\ 1 \end{vmatrix}_{q_p \times 1}, \quad p = \overline{1, m};$$

q_p $(p = \overline{1, m})$ – индексы управляемости линейной системы управления (2), $\sum\limits_{p=1}^{m} q_p = n$. При скалярном управлении (m = 1), система управления (2) приводится к канонической форме

$$\frac{dz_1}{dt} = z_2,\ \frac{dz_2}{dt} = z_3,\ ...,\ \frac{dz_{n-1}}{dt} = z_n,\ \frac{dz_n}{dt} = v, \qquad (3)$$

получившей название формы Бруновского. В случае векторного управления пространство R^n представляется в виде прямой суммы подпространств меньшей размерности $R^n = \sum\limits_{p=1}^{m} R^p$. Размерность подпространств, а, следовательно, и размерности линейных подсистем в системе управления (2) однозначно определяется индексами управляемости q_p $(p = \overline{1, m})$ линейной системы (2). Каждая линейная подсистема уравнений имеет одно управление и структуру системы уравнений вида (3), где число дифференциальных уравнений равно индексу управляемости.

Для перехода от нелинейной системы уравнений (1) к канонической форме Бруновского необходимо ещё выполнить и дополнительные условия – условия инволютивности [2], связанные с совместным интегрированием векторных полей на многообразии M.

Теоретически геометрический метод линеаризации применим для широкого класса объектов, однако его практическое использование обычно ограничивается системами дифференциальных нелинейных уравнений не выше третьего – четвертого порядка и двумя управлениями. Это связано с отсутствием конструктивных методов линеаризации нелинейных объектов управления и существенным разрывом между полученными теоретическими результатами и практическими задачами. В работе [3] удалось получить законы оптимального управления для объекта, который описывался системой обыкновенных дифференциальных нелинейных уравнений 6 порядка. Однако модель электромеханической системы имела только один эквивалентный тяговый двигатель, что существенно ограничило её возможности для поиска оптимальных законов управления реальным приводом. В связи с этим важно уточнение модели привода, путем введения в математическое описание ещё одного или двух двигателей, и разработка метода динамической линеаризации полученных моделей, описываемых соответственно системами дифференциальных уравнений

10 и 14 порядка.

Целью статьи является синтез линейных математических моделей электромеханического объекта, описываемого системами дифференциальных нелинейных уравнений 10 и 14 порядка на основе динамической линеаризации модели объекта управления средствами геометрической теории управления, и поиск оптимальных законов управления объектом с помощью этих моделей.

Основные результаты. В первом приближении модель объекта может быть описана системой уравнений (детальное описание объекта можно найти в работе [4]):

$$\begin{aligned}
&\frac{dx_1}{dt}=x_2; && \frac{dx_g}{dt}=a_{gg}x_g+u_{1,g/4},\ g=4,8;\\
&\frac{dx_2}{dt}=a_{235}x_3x_5+a_{279}x_7x_9-a_{21}x_2-a_{22}x_2^2; && \frac{dx_q}{dt}=a_{qq}x_q+u_{2,(q-1)/4},\ q=5,9;\\
&\frac{dx_k}{dt}=a_{kk}x_k+a_{k,k+1}x_{k+1},\ k=3,7; && \frac{dx_l}{dt}=a_{l2}x_2+a_{lkq}\frac{x_{l-1}}{x_{l-3}},\ l=6,10.
\end{aligned}\qquad(4)$$

Для преобразования системы уравнений (4) к форме Бруновского необходимо выполнение условий инволютивности распределений M^0, M^1, M^2 для рассматриваемой системы [2]. Для распределения M^1 это условие не выполняется, но выполняется для его подраспределений M_k^1 ($k=\overline{1,4}$), поэтому дополнительную переменную можно вводить в любой канал управления. Однако произвольное введение переменной не позволяет решить проблему. Только введение по две переменных в каналы, связанные с управлениями $u_{2,1}, u_{2,2}$, позволило получить инволютивное распределение M^1.

Расширенная модель объекта управления в новых обозначениях имеет вид:

$$\begin{aligned}
&\frac{dy_1}{dt}=y_2; && \frac{dy_6}{dt}=a_{62}y_2+a_{635}\frac{y_5}{y_3};\ \frac{dy_{11}}{dt}=a_{99}y_{11}+y_{13};\\
&\frac{dy_2}{dt}=a_{235}y_3y_5+a_{279}y_9y_{11}-a_{21}y_2-a_{22}y_2^2;\ \frac{dy_7}{dt}=y_8; && \frac{dy_{12}}{dt}=a_{10,2}y_2+a_{10,7,9}\frac{y_{11}}{y_9};\\
&\frac{dy_3}{dt}=a_{33}y_3+a_{34}y_4; && \frac{dy_8}{dt}=u_2;\\
&\frac{dy_4}{dt}=a_{44}y_4+u_1; && \frac{dy_9}{dt}=a_{77}y_9+a_{78}y_{10};\ \frac{dy_{13}}{dt}=y_{14};\\
&\frac{dy_5}{dt}=a_{55}y_5+y_7; && \frac{dy_{10}}{dt}=a_{88}y_{10}+u_3;\ \frac{dy_{14}}{dt}=u_4.
\end{aligned}\qquad(5)$$

С расширенной моделью (5) связаны векторные поля: $Y(y)=\left|g_1, g_2, ..., g_{14}\right|^{\mathrm{T}}$;

$$Y_1^*=\left|0,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0\right|^{\mathrm{T}};\ Y_2^*=\left|0,0,0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0\right|^{\mathrm{T}};$$

$$Y_3^*=\left|0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,0,0,0,0\right|^{\mathrm{T}};\ Y_4^*=\left|0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1\right|^{\mathrm{T}},$$

где $g_1=y_2$; $g_2=a_{235}y_3y_5+a_{279}y_9y_{11}-a_{21}y_2-a_{22}y_2^2$; $g_3=a_{33}y_3+a_{34}y_4$; $g_4=a_{44}y_4$; $g_5=a_{55}y_5+y_7$; $g_6=a_{62}y_2+a_{635}\cdot y_5/y_3$; $g_7=y_8$; $g_8=0$; $g_9=a_{77}y_9+a_{78}y_{10}$; $g_{10}=a_{88}y_{10}$; $g_{11}=a_{99}y_{11}+y_{13}$; $g_{12}=a_{10,2}y_2+a_{10,7,9}\cdot y_{11}/y_9$; $g_{13}=y_{14}$; $g_{14}=0$.

Для расширенной модели объекта управления распределения [2, 4]

$M^{0*} = \mathrm{span}\{Y_1^*, Y_2^*, Y_3^*, Y_4^*\}$, $M^{1*} = \mathrm{span}\{Y_1^*, Y_2^*, Y_3^*, Y_4^*, L_Y Y_1^*, L_Y Y_2^*, L_Y Y_3^*, L_Y Y_4^*\}$, $M_1^{2*} = \mathrm{span}\{Y_1^*, Y_2^*, Y_3^*, Y_4^*, L_Y Y_1^*, L_Y^2 Y_1^*\}$, $M_2^{2*} = \mathrm{span}\{Y_1^*, Y_2^*, Y_3^*, Y_4^*, L_Y Y_2^*, L_Y^2 Y_2^*\}$, $M_3^{2*} = \mathrm{span}\{Y_1^*, Y_2^*, Y_3^*, Y_4^*, L_Y Y_3^*, L_Y^2 Y_3^*\}$, $M_4^{2*} = \mathrm{span}\{Y_1^*, Y_2^*, Y_3^*, Y_4^*, L_Y Y_4^*, L_Y^2 Y_4^*\}$, где $L_Y Y_k^*$, $L_Y^2 Y_k^*$ $(k = \overline{1,4})$ – соответственно первые и вторые производные Ли вдоль векторного поля Y векторных полей Y_k, являются инволютивными.

На основании теории о линейных эквивалентах для нелинейных аффинных систем с m управлениями [2] получим, что у канонической формы Бруновского четыре клетки (четыре подсистемы дифференциальных уравнений) и она имеет вид:

$$\frac{dz_i}{dt} = z_{i+1},\ i = 1, 2, 3, 5, 6, 7, 9, 11, 12, 13;\ \frac{dz_4}{dt} = v_1;\ \frac{dz_8}{dt} = v_2;\ \frac{dz_{10}}{dt} = v_3;\ \frac{dz_{14}}{dt} = v_4, \quad (6)$$

где v_k $(k = \overline{1,4})$ – управления.

Математическое моделирование объекта управления в форме (6) подтвердило корректность синтезированной модели. Затем полученные подсистемы уравнений были использованы для поиска оптимальных управлений электромеханической системой.

В математической модели электромеханической системы с тремя тяговыми двигателями переменные k, g, q, l в модели (4) принимают по три значения, а модель в форме Бруновского для этого случая имеет 20-й порядок и содержит шесть подсистем линейных дифференциальных уравнений.

Выводы. Таким образом, впервые средствами дифференциальной геометрии получены работоспособные линейные математические модели электромеханической системы, эквивалентные нелинейные модели которых описываются системами обыкновенных дифференциальных уравнений 10 и 14 порядка. Полученные линейные модели могут быть использованы в СППР для синтеза оптимальных законов управления динамическим объектом. В дальнейшем предполагается уточнение исходных моделей объекта с учетом параллельной работы двигателей во всех его основных режимах функционирования, получение линейных моделей объекта в форме Бруновского для этих режимов и синтез с их помощью системы оптимального управления объектом.

Литература

1. Byrnes C., Isidori A. A survey of recent developments in nonlinear control theory // Proc. of the I IFAC Symp. Robot Conf., Barselona, Nov. 6 – 8. – 1985. – P. 287 – 291.

2. Краснощёченко В.И., Крищенко А.П. Нелинейные системы: геометрический метод анализа и синтеза. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2005. – 520 с.

3. Дмитриенко В.Д., Заковоротный А.Ю., Мезенцев Н.В. Синтез оптимальных законов управления движением дизель-поезда с помощью математической модели в форме Бруновского // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – Харків: УкрДАЗТ. – 2010. – Вип. 5-6. – С. 7–13.

4. Дмитриенко В.Д., Заковоротный А.Ю., Носков В.И. Линеаризация математической модели дизель-поезда с тяговым асинхронным приводом // Вісник НТУ "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ". – 2011. – № 31. – С. 26 – 36.