

С.И. ОСАДЧИЙ, к.т.н., доц., зав. каф. КНТУ, г. Кировоград,
Л.Г. ВИХРОВА, к.т.н., проф., декан КНТУ, г. Кировоград

СТРУКТУРНАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ В ЗАДАЧЕ ЛИНЕАРИЗАЦИИ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ ПРОДОЛЬНОГО ГЛИССИРОВАНИЯ ТРАНЦА СУПЕРКАВИТАЦИОННОГО ОБЪЕКТА

В статье рассмотрены особенности линеаризации уравнений продольного движения суперкавитационного объекта в условиях глиссирования его кормы в вертикальной плоскости и обоснован новый алгоритм структурной идентификации, позволяющий заменить нелинейную связь с запаздыванием эквивалентным векторным динамическим звеном, на выходе которого действует стохастическое возмущение. Ил.: 1. Библиогр.: 12 назв.

Ключевые слова: линеаризация, структурная идентификация, выход, возмущение.

Постановка проблемы. Достижение наивысшей точности движения суперкавитационных объектов (СКО) [1, 2] по заданной траектории при минимальных затратах на управление может быть осуществлено [3] в оптимальных системах стохастической стабилизации. Одна из эффективных методологий создания оптимальных замкнутых систем управления [4] основана на использовании линеаризованной модели динамики объекта управления и квадратичного критерия качества. Этот критерий учитывает как характеристики отклонений от заданной траектории движения, так и характеристики отклонений управляющих воздействий от балансирующих значений. Разработка модели динамики движения СКО представляет собой сложную научно-техническую задачу, поскольку взаимодействие этого объекта с окружающей средой [5, 6] в носовой части носит линейный характер, а в кормовой – нелинейный с зоной нечувствительности.

Анализ литературы. Получению линеаризованных уравнений движения СКО посвящено целый ряд работ, к примеру [1, 6, 7]. При этом процесс линеаризации основан на принятии ряда допущений. Например, в работе [7] полагают, что в месте взаимодействия транца СКО с газопаровой смесью диаметр каверны [8] приближается к диаметру корпуса объекта и постоянен, а угол погружения мал, и заменяют нелинейную функцию давления, полученную Логвиновичем Г.В., на двумодальную линейную функцию. Главным недостатком такого подхода к созданию модели динамики объекта управления является появление в контурах управления реальной системы малых

дополнительных сигналов, которые в случае управления движением СКО, как неустойчивого динамического объекта [1, 7], могут приводить и, по-видимому, приводят к возникновению его сходов с заданной траектории.

Цель статьи. Учитывая то, что сила, действующая на транец СКО при глиссировании, представляет собой многомерную нелинейную обратную связь с запаздыванием [8], обосновать метод, позволяющий заменить эту связь эквивалентным векторным линейным динамическим элементом, на выходе которого действует стохастическое возмущение.

Основные материалы исследований. Допустим, что продольное движение СКО, как и в работе [7], описывается следующей системой канонических дифференциальных уравнений в векторной форме

$$Px = Mu + B_2g + F_p(t, \tau), \quad (1)$$

где P – матрица размерности $n \times n$, которая характеризует свободное движение объекта и имеет следующую структуру:

$$P = sE_n - A, \quad (2)$$

где A – числовая матрица размерности $n \times n$, значения элементов которой определяются по известным формулам [7] и зависят от конструкции корпуса СКО и скорости его движения; x – n -мерный вектор выходных координат объекта; u – m -мерный вектор сигналов управления рулями; M – числовая матрица размерности $n \times m$, значения элементов которой определяются аналогично матрице A ; B_2 – n -мерная вектор-строка с известными коэффициентами; g – ускорение свободного падения; $F_p(t, \tau)$ – n -мерный вектор-столбец сил давления, вызванных взаимодействием кормовой части СКО с газопаровой смесью, нелинейным образом зависящих [5, 7, 8] от выходных координат объекта, радиуса каверны в кормовой части СКО R_c , а также от времени движения частиц среды обтекания от носа до кормы τ .

Для линеаризации системы уравнений (1) воспользуемся идеей, обоснованной в статье [9], и представим вектор функций $F_p(t, \tau)$ в виде следующей суммы

$$F_p(t, \tau) = B_4 B_3^0 x + v, \quad (3)$$

где B_4 – известный [7, 8] n -мерный вектор-столбец, а B_3^0 – вектор-строка, структура и параметры элементов которой подлежат поиску; v – n -мерный вектор стохастических возмущений, возникающих на выходе

эквивалентного динамического звена, динамические характеристики которого также должны быть определены. В таком случае, линейаризация системы уравнений (1) сводится к решению задачи структурной идентификации вектора передаточных функций B_3^0 или произведения $B_3^0 B_4$ и неслучайных динамических характеристик вектора v . Данная задача формулируется следующим образом.

Предположим, что динамика объекта линейаризации характеризуется системой дифференциальных уравнений (1) – (3), доступными для измерения и регистрации являются векторы u и x , а априорно известными есть матрицы P, M, B_2, B_4 (рис.).

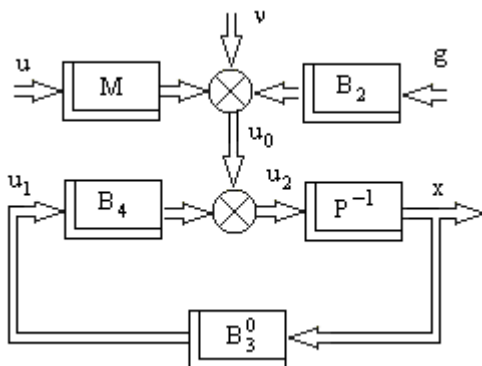


Рис. Структурная схема эквивалентного объекта

Будем полагать также, что в записях компонентов векторов u и x преобладают регулярные тренды, а вектор возмущений v является выходным сигналом формирующего фильтра с передаточной функцией N_0

$$v = N_0 \delta_0, \quad (4)$$

где δ_0 – изображение Лапласа вектора единичных дельта функций.

Необходимо по найденным в результате эксперимента и первичной обработки моделям динамики регулярных составляющих векторов u и x , а также заданным матрицам P, M, B_2, B_4 найти матрицы передаточных функций B_3^0 и N_0 .

Для решения поставленной задачи идентификации представим систему дифференциальных уравнений (1) в изображениях по Лапласу при нулевых начальных условиях с учетом выражения (4) в виде

$$\begin{cases} x_0 = P^{-1}Mu_0 + P^{-1}B_4u_1 + P^{-1}B_2g + P^{-1}N_0\delta_0; \\ u_1 = B_3^0x. \end{cases} \quad (5)$$

По аналогии с монографией [3] введем в рассмотрение вектор изображений Лапласа обобщенных входных сигналов y_p , действующих на входе эквивалентного линейного элемента с передаточной функцией B_3^0 ,

$$y_p = \begin{bmatrix} x' & \delta_0' \end{bmatrix}, \quad (6)$$

и блочную матрицу передаточных функций Φ , характеризующую динамику неизвестной части объекта, которая должна быть найдена,

$$\Phi = \begin{bmatrix} B_4B_3^0 & N_0 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

С учетом выражений (6), (7) система уравнений (5) приводится к виду

$$x = P^{-1}Mu + P^{-1}B_2g + P^{-1}\Phi y_p, \quad (8)$$

тогда вектор ошибок идентификации ε может быть представлен как разность левой и правой частей выражения (8)

$$\varepsilon = x - P^{-1}Mu - P^{-1}B_2g - P^{-1}\Phi y_p. \quad (9)$$

Если за критерий качества структурной идентификации принять сумму взвешенных интегральных квадратических ошибок идентификации

$$I = \frac{1}{2\pi j} \int_{-j\infty}^{j\infty} tr(\varepsilon\varepsilon^*R)ds, \quad (10)$$

в котором j – комплексная единица; tr – знак нахождения следа матрицы [10]; "*" – знак эрмитового сопряжения матриц [10]; R – положительно определенная весовая матрица; то задача линеаризации сводится к минимизации функционала (10) на классе физически реализуемых матриц передаточных функций Φ .

Подстановка выражения (9) в функционал (10) позволяет определить связь между значением критерия качества I и варьируемой матрицей передаточных функций Φ в явном виде как

$$I = \frac{1}{2\pi j} \int_{-j\infty}^{j\infty} tr \left(xx^*R - xu^*M^*P^{-1}R - xg^*B_2^*P^{-1}R - xy_p^*\Phi^*P^{-1}R - P^{-1}Mux^*R + \right.$$

$$\begin{aligned}
& + P^{-1}Mu u_* M_* P_*^{-1} R + P^{-1}Mu g_* B_{2*} P_*^{-1} R + P^{-1}Mu y_{p*} \Phi_* P_*^{-1} R - P^{-1}B_2 g x_* R + \\
& + P^{-1}B_2 g u_* M_* P_*^{-1} R + P^{-1}B_2 g g_* B_{2*} P_*^{-1} R + P^{-1}B_2 g y_{p*} \Phi_* P_*^{-1} - \\
& - P^{-1}\Phi y_{p*} x_* R + P^{-1}\Phi y_{p*} u_* M_* P_*^{-1} R + P^{-1}\Phi y_{p*} g_* B_{2*} P_*^{-1} R + \\
& + P^{-1}\Phi y_{p*} y_{p*} \Phi_* P_*^{-1} R \Big) ds .
\end{aligned} \tag{11}$$

Для минимизации функционала (11) на классе устойчивых и физически реализуемых матриц варьируемых передаточных функций Φ воспользуемся методом Винера-Колмогорова и найдем первую вариацию функционала (11)

$$\begin{aligned}
\delta I = \frac{1}{2\pi j} \int_{-j\infty}^{j\infty} tr \{ & \delta\Phi_* (P_*^{-1} R P_*^{-1} M u y_{p*} + P_*^{-1} R P_*^{-1} B_2 g y_{p*} - P_*^{-1} R x y_{p*} + \\
& + P_*^{-1} R P_*^{-1} \Phi y_{p*} y_{p*}) + (y_{p*} u_* M_* P_*^{-1} R P_*^{-1} + y_{p*} g_* B_{2*} P_*^{-1} R P_*^{-1} - y_{p*} x_* R P_*^{-1} + \\
& + y_{p*} y_{p*} \Phi_* P_*^{-1} R P_*^{-1}) \delta\Phi \} ds .
\end{aligned} \tag{12}$$

Введем обозначения

$$\Gamma_* \Gamma = P_*^{-1} R P_*^{-1}, \tag{13}$$

$$D L D_* = y_{p*} y_{p*}, \tag{14}$$

в которых Γ – результат факторизации [11] произведения матриц, стоящего в правой части равенства (13); D – аналитическая только в правой полуплоскости матрица размерности $2n \times 2n$; L – матрица, элементами которой являются единицы размерности $2n \times 2n$. При известной L найдем представления произведений матриц вида

$$\theta_u L = M u y_{p*} D_*^{-1}, \quad \theta_g L = B_2 g y_{p*} D_*^{-1}, \quad \theta_y L = x y_{p*} D_*^{-1},$$

тогда первая вариация функционала (12) сводится к следующему уравнению

$$\begin{aligned}
\delta I = \frac{1}{2\pi j} \int_{-j\infty}^{j\infty} tr \{ & \delta\Phi_* \Gamma_* \left[\Gamma_*^{-1} P_*^{-1} R \left(P_*^{-1} \theta_u + P_*^{-1} \theta_g - \theta_y \right) + \Gamma \Phi D \right] L D_* + \\
& D L_* \left[D_* \Phi_* \Gamma_* + \left(\theta_{u*} P_*^{-1} + \theta_{g*} P_*^{-1} - \theta_{y*} \right) R P_*^{-1} \Gamma_*^{-1} \right] \Gamma \delta\Phi \} ds .
\end{aligned} \tag{15}$$

Обозначим

$$K_0 + K_+ + K_- = \Gamma_*^{-1} P_*^{-1} R (P^{-1} \theta_u + P^{-1} \theta_g - \theta_y), \quad (16)$$

где матрицы K_0 , K_+ и K_- – результат сепарации [3, 12] произведения матриц в правой части равенства (14), тогда физически реализуемая матрица передаточных функций Φ , доставляющая минимум функционалу (11), как показано в работе [12], должна быть найдена по формуле

$$\Phi = (\Phi_{11} \quad \Phi_{12}) = -\Gamma^{-1} (K_0 + K_+) D^{-1}. \quad (17)$$

Сравнение выражений (7) и (17) позволяет найти искомые матрицы передаточных функций эквивалентного векторного динамического звена и многомерного фильтра, формирующего вектор возмущений на выходе этого звена:

$$B_4 B_3^0 = \Phi_{11}; \quad N_0 = \Phi_{12}.$$

Выводы. Таким образом, обоснован новый метод, позволяющий при нулевых начальных условиях идентификации и регулярных сигналах "вход – выход" СКО заменить нелинейную обратную связь по давлениям, действующим при глиссировании его кормы, векторным линейным динамическим объектом, на выходе которого действует возмущение.

Список литературы: 1. *Seon Sik Ahn* An Integrated Approach to the Design of Supercavitating Underwater Vehicles: Doctor's thesis / *Sik Ahn Seon* // Georgia Institute of Technology. – 2007. – P. 160. 2. The Science of War: Weapons // Scientific American Special Online Issue. – Scientific American, Inc. – 2002. 3. *Азарсков В.Н.* Методология конструирования оптимальных систем стохастической стабилизации: Монография / *В.Н. Азарсков, Л.Н. Блохин, Л.С. Житецкий* / Под ред. Блохина Л.Н. – К.: Книжное издательство НАУ, 2006. – 440 с. 4. *Блохин Л.М.* Методологічні основи та етапи забезпечення конкурентноздатності процесів стабілізації існуючих рухомих об'єктів / *Л.М. Блохин, С.І. Осадчий, О.П. Кривоносенко* // Вісник НАУ. – 2009. – № 2. – С. 61-68. 5. *Логвинович Г.В.* Гидродинамика течений со свободными границами / *Г.В. Логвинович.* – К.: Наук. думка, 1969. – 208 с. 6. *Савченко Ю.Н.* О движении в воде на суперкавитационных режимах обтекания / *Ю.Н. Савченко* // Гидромеханика. – 1996. – № 70. – С. 105-116. 7. *Vanek B.* Longitudinal Motion Control of a High-Speed Supercavitation Vehicle / *V. Vanek, J. Bokor, G.J. Balas etc.* // JVC06-12. – P. 1-29. 8. *Эштетейн Л.А.* Течение около тел вращения при малых числах кавитации / *Л.А. Эштетейн* // Труды ЦАГИ. – 1961. – Вып. 817. 9. *Блохин Л.Н.* Нелинейные оптимальные системы стохастической стабилизации / *Л.Н. Блохин, Л.С. Житецкий* // Кибернетика и вычислительная техника. – 2003. – Вып. 139. – С.12-23. 10. *Гантмахер Ф.Р.* Теория матриц / *Ф.Р. Гантмахер.* – М.: Наука, 1988. – 552 с. 11. *Davis M.C.* Factoring the spectral matrix // *M.C. Davis* // IEEE Trans. Automat. Contr. – 1963. – AC-8. – № 4. – P. 296-305. 12. *Алиев Ф.А.* Оптимизация линейных инвариантных во времени систем управления: (монография) / *Ф.А. Алиев, В.Б. Ларин, К.И. Науменко, В.Н. Суңцев.* – Ин-т математики АН УССР. – К.: Наук. думка, 1978. – 327 с.

Статья представлена д.т.н., проф. КНТУ Ревою А.Н.

УДК 681.513

Структурна ідентифікація у задачі лінеаризації моделі динаміки повздожнього глісування транця суперкавітаційного об'єкту / Осадчий С.І., Віхрова Л.Г. // Вісник НТУ "ХПІ". Тематичний випуск: Інформатика і моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2011. – № 36. – С. 128 – 134.

У статті розглянуті особливості лінеаризації рівнянь повздожнього руху суперкавітаційного об'єкту в умовах глісування його корми у вертикальній площині та обґрунтовано новий алгоритм структурної ідентифікації, який дозволяє замінити нелінійний зв'язок із запізненням векторною динамічною ланкою, на виході якої діє стохастичне збурення. Лл.: 1. Бібліогр.: 12 назв.

Ключові слова: лінеаризація, структурна ідентифікація, вихід, збурення.

UDC 681.513

Structural identification in the task of supercavitation object transom's longitudinal aquaplaning dynamics model linearization / Osadchij S.I., Vikhrova L.G. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2011. – № 36. – P. 128 – 134.

The features of a supercavitation object's longitudinal motion equations linearization in the conditions of it's stern vertical inplane equaplaning are considered and new structural identification algorithm is grounded in the issue. This results make possible to replace nonlinear connection with the delay by an equivalent dynamics element with an output stochastic noise. Figs.: 1. Refs.: 12 titles.

Keywords: linearization, structural identification, output, indignation.

Поступила в редакцію 15. 07. 2011