

А.Т. УЛИКЯН, З.Г. ХАНАМИРЯН

**УПРАВЛЕНИЕ ПОХОДКОЙ ЭКЗОСКЕЛЕТА НИЖНИХ
КОНЕЧНОСТЕЙ С ПОМОЩЬЮ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИГНАЛОВ МЫШЦ**

Проведено проектирование человека-робота интерфейса экзоскелетов для людей с ограниченными возможностями, прогнозирующего намерение движения пользователя. Прогнозирование движения осуществлялось искусственным интеллектом по импульсам, записанным с мышц ног пользователя посредством датчиков электромиографа.

Ключевые слова: экзоскелет, искусственный интеллект, нейронная сеть, электронная почта, интерфейс человек-робот.

A.T. ULIKYAN, Z.G. KHANAMIRYAN

**LOWER LIMB EXOSKELETON GAIT CONTROL BY ARTIFICIAL
INTELLECT USING MUSCLE SIGNALS**

The development of a human-robot interface for exoskeletons for people with disabilities, predicting the intention of the user's movement is carried out. The movement prediction is performed by artificial intellect by impulses recorded from the user's leg muscles using electromyography (EMG) sensors.

Keywords: exoskeleton; artificial intelligence; neural network; e-mail; human-robot interface.

УДК 62-50

О.Н. ГАСПАРЯН, Л.М. БУНИАТЯН, В.Г. ИСПИРЯН, Г.А. МЕЛКОНЯН

**АНАЛИЗ РОБАСТНОСТИ ОДНОТИПНЫХ МНОГОМЕРНЫХ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ**

Предлагается методика анализа робастности однотипных многомерных систем автоматического управления при аддитивных возмущениях числовой матрицы жестких взаимных связей между отдельными каналами системы с одинаковыми передаточными функциями. Методика основана на известном в теории многомерных систем методе характеристических передаточных функций. Приведен числовой пример анализа робастности системы управления квадрокоптером.

Ключевые слова: многомерная система управления, однотипная система, анализ робастности, аддитивная неопределенность.

Введение. Робастность систем управления по отношению к возмущениям или неопределенностям параметров является одной из центральных проблем современной теории управления [1-3]. В работе предлагается простая

графическая процедура анализа робастности однотипных многомерных систем автоматического управления (ОМСАУ) по отношению к аддитивным возмущениям числовой матрицы взаимных связей между идентичными отдельными каналами системы. Методика основана на известном методе характеристических передаточных функций (ХПФ) [4], который позволяет свести анализ устойчивости взаимосвязанной многомерной системы управления с N входами и N выходами к анализу устойчивости N независимых фиктивных систем с одним входом и выходом.

Каноническое представление и анализ устойчивости ОМСАУ. Матричная блок-схема линейной однотипной системы показана на рис. 1, где $w(s)$ есть скалярная передаточная функция идентичных отдельных каналов системы, а R - $N \times N$ числовая матрица жестких взаимных связей.

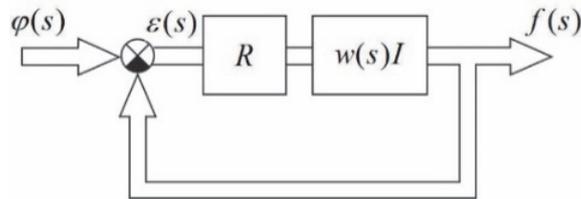


Рис. 1. Матричная блок-схема однотипной многомерной системы автоматического управления

Передаточная матрица $W(s)$ разомкнутой ОМСАУ на рис. 1:

$$W(s) = w(s)R \quad (1)$$

совпадает с точностью до комплексного скалярного множителя $w(s)$ с числовой матрицей взаимных связей R . Соответствующие передаточные матрицы замкнутой ОМСАУ по отношению к векторам выхода и ошибки $T(s)$ и $S(s)$ имеют следующие формы [3]:

$$T(s) = [I + W(s)]^{-1}W(s), \quad S(s) = [I + W(s)]^{-1}. \quad (2)$$

Обозначая через λ_i собственные значения матрицы R , которые для простоты будем предполагать различными, а через C - модальную матрицу, составленную из линейно-независимых собственных векторов c_i , можно записать следующее каноническое представление передаточной матрицы $W(s)$ (1) разомкнутой ОМСАУ:

$$W(s) = C \text{diag}\{\lambda_i, w(s)\} C^{-1}. \quad (3)$$

Как следует из (1) и (3), канонический базис линейной ОМСАУ, составленный из векторов c_i , полностью определяется числовой матрицей взаимных связей R и не зависит от передаточной функции $w(s)$ отдельных каналов. Кроме того, все ХПФ совпадают с точностью до скалярных “коэффициентов усиления” λ_i с передаточной функцией $w(s)$. Учитывая (3) и (4), канонические представления передаточных матриц $S(s)$ и $T(s)$ (2) имеют вид

$$q_i(s) = \lambda_i w(s) \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (4)$$

$$T(s) = C \operatorname{diag} \left\{ \frac{\lambda_i w(s)}{1 + \lambda_i w(s)} \right\} C^{-1}, \quad S(s) = C \operatorname{diag} \left\{ \frac{1}{1 + \lambda_i w(s)} \right\} C^{-1}. \quad (5)$$

Устойчивость замкнутой ОМСАУ определяется распределением корней характеристического уравнения

$$\det[1 + w(s)R] = \prod_{i=1}^N [1 + \lambda_i w(s)] = 0, \quad (6)$$

которое эквивалентно системе N уравнений:

$$1 + \lambda_i w(s) = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, N). \quad (7)$$

Базовая модель возмущений ОМСАУ. В настоящее время имеются разнообразные подходы к моделированию неопределенностей динамических систем [3]. Наиболее общий подход к анализу влияния неопределенностей на устойчивость системы основан на предположении, что неопределенности могут быть представлены в форме так называемой базовой модели возмущений (Basic Perturbation Model), показанной на рис. 2 [3], где $Q(j\omega)$ есть передаточная матрица идеальной (исходной) системы, которая предполагается устойчивой, а $\Delta(j\omega)$ характеризует все неопределенности в динамике системы.

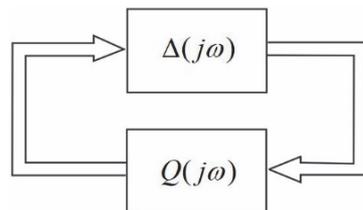


Рис. 2. Базовая модель возмущений линейных МСАУ

Один из ключевых результатов в теории робастности основан на теореме о малом коэффициенте усиления (Small Gain Theorem) [1,2] и формулируется

для системы на рис. 2 следующим образом. Допустим, $Q(j\omega)$ и $\Delta(j\omega)$ устойчивы. Тогда для устойчивости МСАР с неопределенностью $\Delta(j\omega)$ достаточно, чтобы для всех частот ω выполнялись следующие условия:

$$\|Q(j\omega)\| < \frac{1}{\|\Delta(j\omega)\|} \quad \forall \omega \in [-\infty, \infty], \quad (8)$$

где $\|\bullet\|$ обозначает спектральную норму соответствующей матрицы, или

$$\|Q(j\omega)\|_{\infty} < \frac{1}{\|\Delta(j\omega)\|_{\infty}}, \quad (9)$$

где $\|\bullet\|_{\infty}$ обозначает норму Харди (Hardy norm) [3], которая определяется для любой передаточной матрицы $\Phi(j\omega)$ как

$$\|\Phi(j\omega)\|_{\infty} = \sup_{\omega} \|\Phi(j\omega)\|. \quad (10)$$

Два основных типа неопределенностей (возмущений) в теории робастности называются *аддитивными* и *мультипликативными* [3]. Далее при анализе робастности ОМСАУ на рис. 1 мы рассмотрим случай только аддитивных неопределенностей, так как влияние мультипликативных неопределенностей анализируется аналогично.

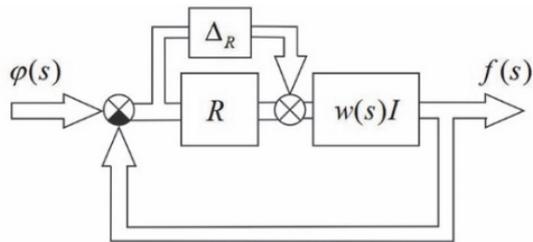


Рис. 3. Аддитивная неопределенность матрицы R

На рис. 3 показана матричная блок-схема ОМСАУ с аддитивной неопределенностью в матрице R , где предполагается, что неопределенность Δ_R является числовой.

Можно показать, что матрица $Q(j\omega)$ на рис. 2 для возмущенной ОМСАУ на рис. 3 имеет с учетом (3) и (5) следующий вид:

$$Q_R(j\omega) = -T(j\omega)R^{-1} = -C \operatorname{diag} \left\{ \frac{w(j\omega)}{1 + \lambda_i w(j\omega)} \right\} C^{-1}. \quad (11)$$

Для нашего случая аддитивной неопределенности Δ_R матрицы R на рис. 3 выражение (8) может быть переписано как

$$\|Q_R(j\omega)\| < \frac{1}{\|\Delta_R\|} \quad \forall \omega \in [-\infty, \infty], \quad (12)$$

где $Q_R(j\omega)$ имеет вид (13). На основании известных правил определения норм произведения матриц имеем следующее выражение для оценки верхней границы нормы $\|Q_R(j\omega)\|$:

$$\|Q_R(j\omega)\| = \left\| C \text{diag} \left\{ \frac{w(j\omega)}{1 + \lambda_i w(j\omega)} \right\} C^{-1} \right\| \leq \nu(C) \max_i \left| \frac{w(j\omega)}{1 + \lambda_i w(j\omega)} \right|, \quad (13)$$

где

$$\nu(C) = \|C\| \cdot \|C^{-1}\| \geq 1 \quad (14)$$

есть число обусловленности модальной матрицы C в (3). Отметим, что число обусловленности (14) равно единице только для нормальных матриц R , имеющих ортогональный канонический базис [4].

Принимая во внимание выражение (13), можно утверждать, что если условие удовлетворяется для всех частот ω , то достаточное условие робастности (16) также выполняется.

$$\max_i \left| \frac{w(j\omega)}{1 + \lambda_i w(j\omega)} \right| < \frac{1}{\nu(C) \|\Delta_R\|} \quad (15)$$

Выражение (15) позволяет придать простую геометрическую интерпретацию условию робастности (12). Если мы заменим знак неравенства в (15) знаком равенства, то после простых алгебраических преобразований это условие может быть записано в следующем виде:

$$\left[\text{Re}\{\lambda_i w(j\omega)\} + \frac{\alpha_i^2}{\alpha_i^2 - 1} \right]^2 + [\text{Im}\{\lambda_i w(j\omega)\}]^2 = \frac{\alpha_i^2}{(\alpha_i^2 - 1)^2}, \quad (16)$$

где

$$\alpha_i = \frac{|\lambda_i|}{\nu(C) \|\Delta_R\|}. \quad (17)$$

Геометрически выражение (16) определяет на комплексной плоскости i -го характеристического годографа $\lambda_i w(j\omega)$ окружность с центром в точке $c_i = -\alpha_i^2 / (\alpha_i^2 - 1)$ на вещественной оси и радиусом $r_i = \alpha_i / (\alpha_i^2 - 1)$ (рис. 4). Достаточное условие робастности (12) будет выполняться, если окружности (16) не пересекаются с соответствующими годографами $\lambda_i w(j\omega)$ для всех $i = 1, 2, \dots, N$.

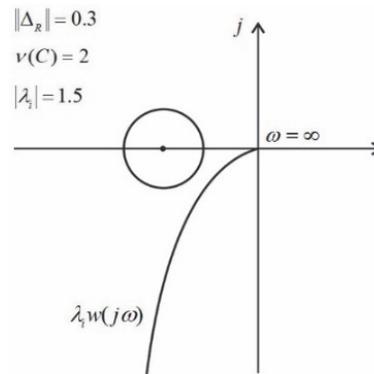


Рис. 4. Анализ робастности ОМСАУ на рис. 3

Числовой пример. Блок-схема на рис. 5 изображает четырехмерную систему управления квадрокоптером со следующими параметрами: $m = 2.5 \text{ kg}$, $I_x = I_y = I_z = 0.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ и идентичными пропорционально-интегрально-дифференцирующими регуляторами в отдельных каналах в виде [5]

$$w_R(s) = 0.0928 + \frac{0.0043}{s} + \frac{5.25}{0.1834s + 1}. \quad (18)$$

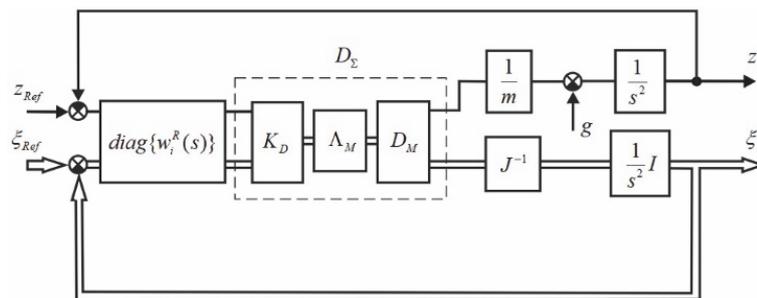


Рис. 5. Система управления квадрокоптером

Диагональная матрица J на рис. 5 есть тензор инерции с элементами I_x, I_y, I_z , а матрицы взаимных связей D_M и $K_D = D_M^{-1}$ равны

$$D_M = \begin{bmatrix} 1.0 & 1.0 & 1.0 & 1.0 \\ 0 & 0.2 & 0 & -0.2 \\ -0.2 & 0 & 0.2 & 0 \\ -0.3 & 0.3 & -0.3 & 0.3 \end{bmatrix}, K_D = \begin{bmatrix} 0.25 & 0 & -2.5 & -0.83 \\ 0.25 & 2.5 & 0 & 0.83 \\ 0.25 & 0 & 2.5 & -0.83 \\ 0.25 & -2.5 & 0 & 0.83 \end{bmatrix}, \quad (19)$$

Диагональная матрица Λ_M на рис. 5:

$$\Lambda_M = I + \Delta_M, \text{ где } \Delta_M = -\text{diag}\{\lambda_i^M\} \quad (0 \leq \lambda_i^M < 1), \quad (20)$$

учитывает частичную потерю эффективности моторов [5]. Отметим, что матрица Λ_M имеет вид аддитивного возмущения единичной матрицы I .

Передаточная матрица разомкнутой ОМСАУ на рис. 5 при $\Lambda_M \neq I$ (and $D_M \neq I$) имеет вид (1), где $w(s) = w_R(s) / s^2$, и

$$R = M_\Sigma^{-1} D_\Sigma = M_\Sigma^{-1} D_M \Lambda_M D_M^{-1}, \quad (21)$$

где M_Σ есть диагональная матрица с элементами: 2.5, 0.5, 0.5, 0.5.

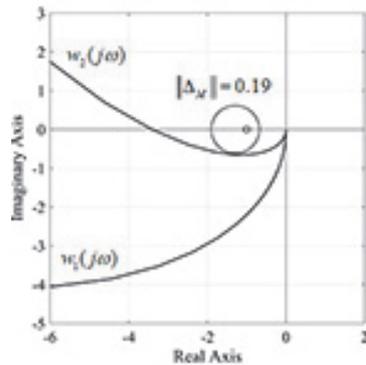


Рис. 6. Анализ робастности системы управления квадрокоптером

Применение описанной методики анализа робастности системы на рис. 5 с аддитивной неопределенностью матрицы R иллюстрируется на рис. 6. При $\|\Lambda_M\| = 0.19$ окружность (16) касается годографов $w_2(j\omega) = w_3(j\omega) = w_4(j\omega) = 2w_R(j\omega) / (j\omega)^2$. Следовательно, устойчивость рассматриваемой системы управления на рис. 5 гарантируется при потере эффективностей моторов до величины $\|\Lambda_M\| = 0.19$. Для больших значений $\|\Lambda_M\|$ достаточное условие робастности (16) не выполняется.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета по высшему образованию и науке РА в рамках научного проекта № 21Т-2D255.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Zhou K., Doyle J. C.** Essentials of Robust Control.-Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1996.
2. **Green M., Limebeer D.J.N.** Linear Robust Control.- Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1995.
3. **Skogestad S., Postlethwaite.** Multivariable Feedback Control: Analysis and Design.- John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, Sussex, UK, 2005.
4. **Gasparyan O.N.,** Linear and Nonlinear Multivariable Feedback Control: A Classical Approach. - John Wiley & Sons Ltd, UK, 2008.- 374 p.
5. **Gasparyan O.N., Darbinyan H.G.** L_1 adaptive control of quadcopters // Proceedings of International Conference Computer Science and Information Technologies 2019, IIAP.-Yerevan, 2019.- P. 137-140.

**Օ.Ն. ԳԱՍՊԱՐՅԱՆ, Լ.Մ. ԲՈՒՆԻԱԹՅԱՆ, Վ.Գ. ԻՍՊԻՐՅԱՆ,
Գ.Ա. ՄԵԼԲՈՆՅԱՆ**

ՄԻԱՏԻՊ ԲԱԶՄԱԶԱՓ ԿԱՌԱՎԱՐՄԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԵՐԻ ՌՈԲԱՍՏՈՒԹՅԱՆ ՎԵՐԼՈՒԾՈՒԹՅՈՒՆ

Առաջարկվում է միատիպ բազմաչափ ավտոմատ կառավարման համակարգերի ռոբաստության վերլուծության մեթոդիկա՝ միևնույն փոխանցման ֆունկցիաներով համակարգի առանձին կապուղիներում կոշտ փոխադարձ կապերով թվային մատրիցի ադիտիվ վրդովմունքների դեպքում: Մեթոդիկան հիմնված է բազմաչափ կառավարման տեսությունում հայտնի բնութագրիչ փոխանցման ֆունկցիաների մեթոդի վրա: Բերված է քառապտուտակի կառավարման համակարգի ռոբաստության վերլուծության թվային օրինակ:

Առանցքային բառեր. բազմաչափ կառավարման համակարգ, միատիպ համակարգ, ռոբաստության վերլուծություն, ադիտիվ անորոշություն:

**O.N. GASPARYAN, L.M. BUNIATIAN, V.G. ISPIRYAN,
G.A. MELKONYAN**

ROBUSTNESS ANALYSIS OF UNIFORM MULTIDIMENSIONAL CONTROL SYSTEMS

A method for the robustness analysis of uniform multivariable control systems in case of additive perturbations of a numerical matrix of cross-connections between separate channels of the system having identical transfer functions is proposed. The method is based on the known n multivariable control method of characteristic transfer functions. A numerical example of robustness analysis of the control system of the quadcopter is given

Keywords: multivariable control system, uniform system, robustness analysis, additive uncertainties.