УДК 629.7:656:51-7

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК ОБЪЕКТА ПО УПРАВЛЯЕМОСТИ

[1]Гарькина И.А., [1]Данилов А.М., [1]Сухов Я.И.

[1]ФГБОУ ВПО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства», Пенза, Россия (440028, Пенза, ул.Германа Титова, 28), e-mail: fmatem@pguas.ru

Осуществляется объективизация оценки оператором устойчивости и управляемости объекта по данным функционирования целостной человеко-машинной (эргатической) системы по специально разработанной методике количественной оценки характеристик объекта. Актуальность исследований определяется возможностью их использования при настройке параметров тренажных и обучающих комплексов для подготовки операторов транспортных систем (авиационных тренажеров, тренажеров наземных, надводных и других транспортных средств). В методике используются аналитические зависимости параметров объекта от инвариантов матрицы системы уравнений движения. Осуществляется классификация объектов управления на основе упруго-демпфирующих характеристик системы, в том числе параметров системы управления. Указываются возможные приближенные методы оценки сведением уравнений продольного движения к его короткопериодической составляющей. Методика прошла неоднократную апробацию при разработке тренажеров различных транспортных средств.

Ключевые слова: эргатические системы, подготовка операторов, тренажные и обучающие комплексы, оценка оператором качества объекта, объективизация.

QUANTIFICATION OF THE OBJECT BY ITS CONTROLLABILITY

[1]Garkina I.A., [1]Danilov A.M., [1]Sukhov Y.I.

[1]Penza state university of architecture and construction (Russia, 440028, Penza, Titov str., 28), e-mail: fmatem@pguas.ru

Is defined as the operator evaluates the quality of the control object; use performance data of the whole man-machine system. Specially developed a method of quantifying the characteristics of the object. The relevance of the study is the ability to use the results for adjustment of parameters of training complexes for the preparation of system operators (flight simulators, simulator ground, surface and other vehicles). In the methodology used analytical parameters of the object depending on the invariants of the matrix system of equations of motion. Is given a classification of objects of management; counted elastic and damping characteristics of the system, including the control system parameters. Indicate approximate evaluation methods (longitudinal motion equations are reduced to short-period component). The method was tested repeatedly in the development of simulators of different vehicles.

Keywords: human-machine systems, training of operators, training complexes, evaluation of the quality of the object, objectification.

При разработке тренажных и обучающих комплексов одной из актуальных задач является количественная оценка оператором устойчивости и управляемости объектом по данным функционирования целостной человеко-машинной (эргатической) системы. Напомним, устойчивость рассматривается, как способность объекта без вмешательства оператора сохранять заданный режим функционирования; а управляемость - должным образом реагировать на отклонение органов управления (для авиационной эргатической системы - рулей высоты, поворота и элеронов). Очевидна связь между равновесием, устойчивостью и управляемостью. Так, в общем случае движение самолета является весьма сложным, поэтому для простоты и удобства анализа на начальном этапе осуществляют декомпозицию (разложение)

[2,4] на простейшие виды: продольное и боковое. Ограничимся количественной оценкой указанных характеристик объекта, исходя из параметров продольного движения.

Воспользуемся известными уравнениями [1] движения объекта с системой управления для короткопериодической составляющей:

$$\dot{\omega}_z = a_{11}\omega_z + a_{12}\alpha + b_1\varphi_{CT}^{np}$$

$$\dot{\alpha} = a_{21}\omega_z + a_{22}\alpha + b_2\varphi_{CT}^{np}$$

$$\dot{z} = a_{11}\omega_z + a_{12}\alpha - 0{,}2z + b_1\varphi_{CT}^{np}$$

$$\dot{x}_6 = -10k_{n\phi}x_6 + 10k_{n\phi}(k_ш + 0{,}08)x_p$$

$$\dot{\varphi}_{CT}^{\omega_z} = [(\mu + k_z + 0{,}3)a_{11} + k_z]\omega_z + (\mu + k_z + 0{,}3)a_{12}\alpha + (\mu + k_z + 0{,}3)b_1\varphi_{CT}^{np} - \varphi_{CT}^{\omega_z}$$

$$\varphi_{CT}^{np}(t) = \begin{cases} x_8(t), \left|\nabla(t, t-\Delta t)\right| < 2{,}61 \\ \pm 2{,}61 + \varphi_{CT}^{np}(t-\Delta t), \left|\nabla(t, t-\Delta t)\right| \geq 2{,}61, \end{cases}$$

где

$$x_8(t) = \varphi_{CT}^{\omega_z}(t) + (k_{onp} + 1)\left|-\alpha(t) + \left|z(t)\right|\right| + 0{,}4 \cdot i_{n_y}(n_y(t) - 1) + x_6(t) + \Delta\varphi(t),$$

$$\nabla(t, t-\Delta t) = x_8(t) - \varphi_{CT}^{np}(t-\Delta t).$$

Во всех уравнениях, кроме последнего, искомые функции рассматриваются в точке t:

$$\omega_z = \omega_z(t), \alpha = \alpha(t), z = z(t), x_6 = x_6(t), \varphi_{CT}^{\omega_z} = \varphi_{CT}^{\omega_z}(t), \varphi_{CT}^{np} = \varphi_{CT}^{np}(t), x = x(t), x_p = x_p(t).$$

Для симметрии введем:

$$\omega_z \overset{\Delta}{=} x_1, \quad \alpha \overset{\Delta}{=} x_2, \quad z \overset{\Delta}{=} x_3, \quad x_6 \overset{\Delta}{=} x_4; \ \varphi_{CT}^{\omega_z} \overset{\Delta}{=} x_5, \quad \varphi_{CT}^{np} \overset{\Delta}{=} u$$

($\overset{\Delta}{=}$ - равенство по определению).

Система приведется к виду:

$$\dot{x}_1 = a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + b_1u$$

$$\dot{x}_2 = a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + b_2u$$

$$\dot{x}_3 = a_{31}x_3 + a_{32}x_2 + a_{33}z + b_1u$$

$$\dot{x}_4 = a_{44}x_4 + b_4x_p$$

$$\dot{x}_5 = a_{51}x_1 + a_{52}x_2 + a_{55}x_5 + a_{5u}u$$

$$u(t) = \begin{cases} x_8(t), \left|\ \nabla(t, t-\Delta t)\right) < 2{,}61\right| \\ \pm 2{,}61 + u(t-\Delta t), \left|\ \nabla(t, t-\Delta t)\right| \geq 2{,}61, \end{cases}$$

где:

$$\dot{x}_8(t) = x_5(t) + (k_{onp} + 1)\left|-x_2(t) + \left|x_3(t)\right|\right| + 0{,}4 \cdot i_{n_y}\left[n_y(t) - 1\right] + x_4(t) + \Delta\varphi(t),$$

$$\nabla(t, t-\Delta t) = x_8(t) - u(t-\Delta t).$$

Принято:

$$a_{31}=a_{11},\ a_{32}=a_{12},\ a_{33}=-0{,}2, a_{44}=-10k_{n\phi},\ b_4=10k_{n\phi}\left(k_{ш}+0{,}08\right);$$

$$a_{51}=(\mu+k_z+0{,}3)a_{11}+k_z, a_{52}=(\mu+k_z+0{,}3)a_{12},\ a_{55}=-1,\ a_{5u}=(\mu+k_z+0{,}3)b_1.$$

В линейной зоне ($\left|x_8(t)-x_8(t-\Delta t)\right|<2{,}61$) будем иметь:

$$\dot{x}_1=a_{11}x_1+a_{12}x_2+b_1x_8$$

$$\dot{x}_2=a_{21}x_1+a_{22}x_2+b_2x_8$$

$$\dot{x}_3=a_{31}x_1+a_{32}x_2+a_{33}x_3+b_1x_8$$

$$\dot{x}_4=a_{44}x_4+b_4x_p$$

$$\dot{x}_5=a_{51}x_1+a_{52}x_2+a_{55}x_5+a_{5u}x_8.$$

Подставив

$$x_8=x_4+x_5+k_0\left|-x_2+\left|x_3\right|\right|+k_nn_0+\Delta\varphi;\ k_{опр}+1\overset{\Delta}{=}k_0,\ 0{,}4i_{n_y}\overset{\Delta}{=}k_n,\ n_y-1\overset{\Delta}{=}n_0$$

окончательно получим систему уравнений короткопериодического движения в виде:

$$x_1=a_{11}x_1+a_{12}x_2+b_1x_4+b_1x_5+b_1k_0\left|-x_2+\left|x_3\right|\right|+b_1k_nn_0+b_1\Delta\varphi$$

$$\dot{x}_2=a_{21}x_1+a_{22}x_2+b_2x_4+b_2x_5+b_2k_0\left|-x_2+\left|x_3\right|\right|+b_2x_nn_0+b_2\Delta\varphi$$

$$\dot{x}_3=a_{31}x_1+a_{32}x_2+a_{33}x_3+b_1x_4+b_1x_5+b_1k_0\left|-x_2+\left|x_3\right|\right|+b_1k_nn_0+b_1\Delta\varphi \tag{1}$$

$$\dot{x}_4=a_{44}x_4+b_4x_p$$

$$\dot{x}_5=a_{51}x_1+a_{52}x_2+a_{5u}x_4+(a_{55}+a_{5u})x_5+a_{5u}k_0\left|-x_2+\left|x_3\right|\right|+a_{5u}k_nn_0+a_{5u}\Delta\varphi,$$

$$(\left|x_8(t)-x_8(t-\Delta t)\right|<2{,}61).$$

Для некоторых используемых структурных схем САУ $\left|-x_2+\left|x_3\right|\right|$ можно заменить на $(-x_2+x_3)$, что существенно облегчает исследование вопросов динамики. В этом случае уравнения динамики имеют вид:

$$x_1=a_{11}x_1+(a_{12}-b_1k_0)x_2+b_1k_0x_3+b_1x_4+b_1x_5+b_1k_nn_0+b_1\Delta\varphi$$

$$x_2=a_{21}x_1+(a_{22}-b_2k_0)x_2+b_2k_0x_3+b_2x_4+b_2x_5+b_2k_nn_0+b_2\Delta\varphi$$

$$x_3=a_{31}x_1+(a_{32}-b_1k_0)x_2+(a_{33}+b_1k_0)x_3+b_1x_4+b_1x_5+b_1k_nn_0+b_1\Delta\varphi$$

$$x_4=a_{44}x_4+b_4x_p$$

$$x_5=a_{51}x_1+(a_{52}-a_{5u}k_0)x_2+a_{5u}k_0x_3+a_{5u}x_4+(a_{53}+a_{5u})x_5+a_{5u}k_nn_0+a_{5u}\Delta\varphi.$$

В простейшем случае короткопериодическая составляющая продольного движения описывается системой:

$$x_1 = a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + b_1 u$$
$$x_2 = a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + b_2 u, \qquad (2)$$

$x_1(t) = \omega_Z(t), x_2(t) = \alpha(t).$

Для оценки динамических характеристик объекта в [3, 6] предлагается функционал:

$$\Phi(S) = -\frac{a}{\max \operatorname{Re}\lambda_i} + b\max_i\left|\frac{\operatorname{Im}\lambda_i}{\operatorname{Re}\lambda_i}\right| + c\cdot\max_i\left|\operatorname{Im}\lambda_i\right| + d\frac{1}{\min \operatorname{Im}\lambda_i}, \qquad (3)$$

λ_i - корни характеристического полинома. Для системы второго порядка функционал представится в виде

$$\Phi(S) = \left(\frac{a}{\omega} + b\right)\sqrt{\left|\frac{1}{\xi^2} - 1\right|} + c\omega + \frac{d}{\omega}, \qquad (4)$$

$\omega = \sqrt{\left|\Delta - \sigma^2/4\right|}$, $\xi = -\sigma/2\sqrt{\Delta}$, σ - след матрицы $A = \left\|a_{ij}\right\|$, Δ - detA.

Выбор весовых коэффициентов нетривиален (связан с определением по данным нормального функционирования корреляционной зависимости между $\Phi(S)$ и ω, ξ).

Воспользуемся предложенным функционалом для оценки динамических характеристик объекта с САУ (частный случай (1)):

$$\dot{x}_1 = a_{11}x_1 + (a_{12} - k_0 b_1)x_2 + k_0 b_1 x_3 + b_1 x_4 + b_1 u_1$$
$$\dot{x}_2 = a_{21}x_1 + (a_{22} - k_0 b_2)x_2 + k_0 b_2 x_3 + b_2 x_4 + b_2 u_1$$
$$\dot{x}_3 = a_{11}x_1 - (a_{12} - k_0 b_1)x_2 + (k_0 b_1 - 0{,}2)x_3 + b_1 x_4 + b_1 u_1 \qquad (5)$$
$$\dot{x}_4 = -10k_{n\phi}x_4 + b_4 u_2$$
$$\dot{x}_5 = (\chi a_{11} + k_z)x_1 + \chi(a_{12} - k_0 b_1)x_2 + \chi k_0 b_1 x_3 + \chi b_1 x_4 + \chi b_1 u_1;$$

$x_1(t) = \omega_z(t), x_2(t) = \alpha(t), x_3(t), x_4(t), x_5(t)$ - координаты САУ; $u_1 = k_n n_0 + \Delta\varphi, u_2 = x_p$ - входные воздействия; $b_1, b_2, b_4, k_0, \chi = \mu + k_z + 0{,}3,$ k_z - коэффициенты усиления.

Упростим (5), введя новые переменные

$$x_3(t) = x_3(t) - x_1(t)$$
$$x_5(t) = x_5(t) - \chi x(t)$$

и рассматривая $x_4(t)$ как входной сигнал системы. Получим:

$$\dot{x}_1 = \tilde{a}_{11}x_1 + \tilde{a}_{12}x_2 + k_0 b_1 \tilde{x}_3 + b_1 \tilde{x}_5 + b_1 \tilde{u}_1$$
$$\dot{x}_2 = \tilde{a}_{21}x_1 + \tilde{a}_{22}x_2 + k_0 b_2 \tilde{x}_3 + b_2 \tilde{x}_5 + b_2 \tilde{u}_1$$
$$\dot{\tilde{x}}_3 = -0{,}2x_1 - 0{,}2\tilde{x}_3 \qquad (6)$$
$$\dot{\tilde{x}}_5 = -(\mu + 0{,}3)x_1 - \tilde{x}_5;$$

$$\tilde{a}_{11} = a_{11} + k_0 b_1 + \chi b_1,\ \tilde{a}_{12} = a_{12} - k_0 b_1,\ \tilde{a}_{22} = a_{22} - k_0 b_2,\ \tilde{a}_{21} = a_{21} + k_0 b_2 + \chi b_2,$$

$$\tilde{u}_1(t) = k_n n_0(t) + \Delta\varphi(t) + x_p.$$

Из 1 и 4-го уравнения следует

$$\tilde{x}_3(t) = e^{-0,2t}(C_3 - 0,2\int_{t_0}^{t} e^{0,2\tau} x_1(\tau) d\tau,$$

$$\tilde{x}_5(t) = e^{-t}(C_5 - (\mu + 0,3)\int_{t_0}^{t} e^{\tau} x_1(\tau) d\tau.$$

Из малости времени регулирования t - t_0 значений $x_1(t) = \omega_z(t)$ следует слабая зависимость $\tilde{x}_3(t)$ и $\tilde{x}_5(t)$ от $x_1(t)$ (зависимость от $x_2(t)$ отсутствует!). Поэтому $\tilde{x}_3(t)$ и $\tilde{x}_5(t)$ можно рассматривать как входные воздействия системы с матрицей

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} a_{11} + k_0 b_1 + \chi b_1 & a_{12} - k_0 b_1 \\ a_{21} + k_0 b_2 + \chi b_2 & a_{22} - k_0 b_2 \end{bmatrix}.$$

Зависимость от параметров САУ определится по формулам перехода от A к $\tilde{A}$, в частности,

$$\tilde{\sigma} = \sigma + k_0(b_1 - b_2) + \chi b_1$$

$$\tilde{\Delta} = \Delta + a_{22}(k_0 + \chi)b_1 - a_{11}k_0 b_2 - k_0 \chi b_1 b_2 + a_{21}k_0 b_1 - a_{12}(k_0 + \chi)b_2 + k_0 b_1 b_2 (k_0 + \chi).$$

С учетом

$$\tilde{\xi} = -\tilde{\sigma}/2\sqrt{\tilde{\Delta}},\ \tilde{\omega} = \sqrt{\left|\Delta - \tilde{\sigma}^2/4\right|}$$

влияние САУ на динамические характеристики системы можно оценить по смещению точки ($\tilde{\xi}$,$\tilde{\omega}$) относительно (ξ , ω) на плоскости $\xi O \omega$.

Множество объектов отнесем к k-му классу в выбранной N-балльной шкале, если удовлетворяется условие

$$d_{k-1} < \Phi \le d_k.$$

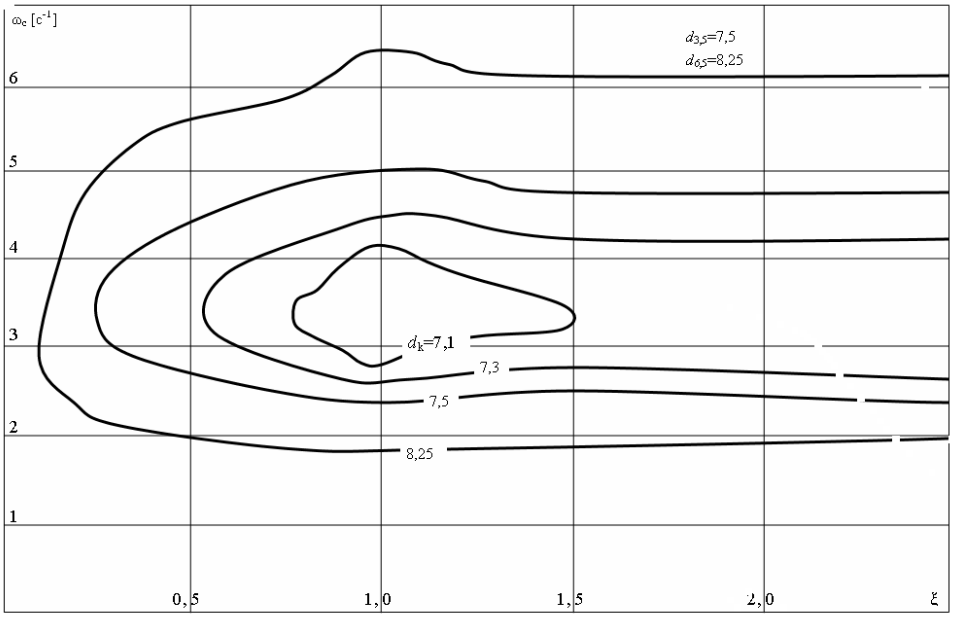
Границы областей D_k для объектов k-го класса определятся значениями d_k, которые представляются в виде двух однозначных ветвей кривой

$$\omega^2 + (b\mu - d_k)\omega + (d + a\mu) = 0$$

($\Phi(\xi, \omega) = d_k$; $\mu = \sqrt{\left|\frac{1}{\xi^2} - 1\right|}$) функции $\omega = \omega(\xi)$, а именно:

$$\omega_{1,2} = -\frac{b\mu - d_k}{2} \mp \sqrt{\left(\frac{b\mu - d_k}{2}\right)^2 - (d_k + a\mu)}.$$

В частности, класс k=3,5 определяется по указанным формулам при $d_k = 7{,}5$; $(a = 0{,}1; b = 0{,}2; d = 12)$, классу k=6,5 соответствует значение $d_k = 8{,}25$ (рисунок).



К классификации объектов на плоскости $\xi O \omega$.

Таким образом, *свойства системы* (6) *полностью определяются матрицей* $\tilde{A}$*; а оценку объекта для системы* (5) *можно производить по оценкам для системы* (2). Приведенный подход неоднократно использовался при настройке параметров реальных систем [5,7,8].

Список литературы

1. Авиационные тренажеры модульной архитектуры: монография; под редакцией Лапшина Э.В., д.т.н., проф. Данилова А.М. – Пенза: ИИЦ ПГУ. – 2005. – 146 с.

2. Будылина Е.А., Гарькина И.А., Данилов А.М. Приближенные методы декомпозиции при настройке имитаторов динамических систем / Региональная архитектура и строительство. – 2013. – № 3. – С. 150-156.

3. Гарькина И.А., Данилов А.М., Домке Э.Р. Математическое моделирование управляющих воздействий оператора в эргатической системе / Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). –2011. – № 2. – С. 18-23.

4. Гарькина И.А., Данилов А.М., Петренко В.О. Решение приближенных уравнений: декомпозиция пространственного движения управляемого объекта // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 5; URL: www.science-education.ru/119-14766.

5. Гарькина И.А, Данилов А.М., Пылайкин С.А. Транспортные эргатические системы: информационные модели и управление / Мир транспорта и технологических машин. – №1(40). – 2013. – С.115-122.
6. Гарькина И.А., Данилов А.М., Пылайкин С.А.Тренажеры и имитаторы транспортных систем: выбор параметров вычислений, оценка качества / Мир транспорта и технологических машин. – 2013. – № 3 (42). – С. 115-120.
7. Данилов А.М., Домке Э.Р., Гарькина И.А. Формализация оценки оператором характеристик объекта управления / Известия ОрелГТУ. Информационные системы и технологии. – 2012. – № 2 (70). – С.5-11.
8. Родионов Ю.В., Ветохин А.С. Динамический автотренажер / Мир транспорта и технологических машин. – 2011. - №4. –С.90-93.

Рецензенты:

Родионов Ю.В., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Эксплуатация автомобильного транспорта»декан автомобильно-дорожного института ПГУАС, г. Пенза;

Кошев А.Н., д.х.н., профессор, профессор кафедры «Информационно-вычислительные системы» Пензенского государственного университета архитектуры и строительства, г.Пенза.