УДК 629.7:656:51-7

ОЦЕНКА ОПЕРАТОРОМ ХАРАКТЕРИСТИК ОБЪЕКТА ПО УПРАВЛЯЕМОСТИ

Гарькина И.А., Данилов А.М., Сухов Я.И.

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

Предлагается методика объективизации оценки оператором объекта (в предположении справедливости гипотезы о его стационарности) с точки зрения формирования управляющих воздействий. Методика основывается на специально разработанном функционале качества, учитывающем как апериодичность, так и колебательность объекта управления. Линии уровня функционала качества рассматриваются как границы областей равных оценок характеристик объекта. В качестве основных характеристик объекта используются след матрицы системы и значение определителя. Полученные области использовались для объективизации оценки оператором характеристик объекта в процессе управления, а также для оценки имитационных характеристик тренажных и обучающих комплексов по подготовке операторов (наземных, воздушных, надводных транспортных средств) на основе данных нормального функционирования систем: оператор - реальный объект, оператор - модель объекта.

Ключевые слова: эргатические системы, объект управления, оценка оператором характеристик объекта, объективизация оценки, функционал качества, области равных оценок, приложения.

ESTIMATES OPERATOR OF THE CHARACTERISTICS OF THE OBJECT BY CONTROL

Garkina I.A., Danilov A.M., Suhov Y.I.

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

The technique of objective estimation of the facility operator is given (assuming the hypothesis of stationarity) from the viewpoint of formation control actions. The technique is based on a specially developed functional quality (recorded as aperiodicity and oscillation control object). The boundaries of the areas of equal ratings (characteristics of the object) are line-level functional quality. The main characteristics of an object used the trace of the matrix and the value of the determinant.The resulting field used for objective estimation of operator characteristics of the object in the process control, and to assess the performance of simulation and training systems trenazhnyh on training of operators (land, air, surface vehicles) based on the normal functioning of the systems: operator - the real object, the operator - the model object.

Keywords: human-machine system, the control object, the evaluation of operator characteristics of the object, objectification assessment, functional of quality, field of equal ratings, application

Рассматриваются актуальные для разработки тренажных и обучающих комплексов (для подготовки операторов наземных, воздушных, надводных транспортных средств) вопросы объективизации оценки оператором эргатической системы характеристик объекта по его управляемости [1…4]. Предполагается справедливость гипотезы о стационарности параметров объекта, описываемого уравнением движения вида (режим стабилизации):

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + f(t). \qquad (1)$$

Матрицами $A = (a_{ij})_{m\times n}$ и $B = (b_{ij})_{n\times m}$ полностью определяется объект управления;

$$x = (x_1, x_2, \ldots, x_n)^{\text{т}},\ u = (u_1, u_2, \ldots, u_m)^{\text{т}},\ f(t) = (f_1(t), f_2(t), \ldots, f_s(t))^{\text{т}}.$$

Характеристики объекта определяются через инварианты матрицы $A = (a_{ij})_{m\times n}$ (собственные числа $\lambda_i = \alpha_i \pm j\beta_i$, след матрицы $trA = \sum_i a_{ii}$, $|A|$); ими же определяются решения системы S:

$$\dot{x} = Ax . \qquad (2)$$

При

$$x = \begin{bmatrix} \omega_c \\ \alpha \end{bmatrix}, \; A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}, \; B = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix}$$

в зависимости от инвариантов $\sigma = a_{11} + a_{22}$ ($trA = \sum_i a_{ii}$) и $\Delta = |A|$ определяются 12 качественно различных систем (объектов управления):

1. $\sigma < 0, \quad 0 < \Delta \le \sigma^2 / 4$,
2. $\sigma < 0$, $\Delta<0$;
3. $\sigma > 0, \quad 0 < \Delta \le \sigma^2 / 4$,
4. $\sigma < 0$, $\Delta=0$;
5. $\sigma > 0$, $\Delta=0$;
6. $\sigma = 0$, $\Delta=0$;
7. $\sigma < 0, \quad \Delta = \sigma^2 / 4; \; a_{12}^2 + a_{21}^{22} > 0;$
8. $\sigma > 0$, $\Delta=\sigma^2 / 4$; $a_{12}^2 + a_{21}^{22} > 0$;
9. $\sigma = 0$, $\Delta=0$; $a_{12}^2 + a_{21}^{22} > 0$;
10. $\sigma < 0$, $\Delta>\sigma^2 / 4$;
11. $\sigma > 0$, $\Delta>\sigma^2 / 4$;
12. $\sigma = 0$, $\Delta>\sigma^2 / 4$.

Здесь собственные числа $\lambda_{1,2} = \frac{\sigma^2}{4} \pm \sqrt{\frac{\sigma^2}{4} - \Delta}$.

Оценка качества объекта производится по функционалу качества

$$\Phi(\mathbf{S}) = -a \frac{1}{\max \operatorname{Re} \lambda_i(\sigma,\Delta)} + b \max_i \left| \frac{\operatorname{Im} \lambda_i(\sigma,\Delta)}{\operatorname{Re} \lambda_i(\sigma,\Delta)} \right| + c \max_i \left| \operatorname{Im} \lambda_i(\sigma,\Delta) \right| + d \frac{1}{\min_i \operatorname{Im} \lambda_i(\sigma,\Delta)} . \qquad (13)$$

Последние два слагаемых ограничивают собственные частоты колебаний объекта как сверху, так и снизу; вторым слагаемым определяется уровень колебательности. *Система* **S** *тем лучше, чем меньше величина* $\Phi(\mathbf{S})$; a, b, c, d - весовые константы. Выбор весовых констант осуществлялся на основе анализа корреляционных связей [5] между $\Phi(\mathbf{S})$ и инвариантами σ, Δ (возможно использование итеративного способа).

Естественно рассматриваются лишь экспоненциально устойчивые системы с инвариантами, удовлетворяющими условиям σ <0; Δ>0 (системы 1,7, 10).

В выбранной N-балльной шкале система $S_{\sigma,\Delta}$ принадлежит классу k тогда и только тогда, когда ее инварианты $\sigma,\Delta \in D_к$, где области на плоскости $D_к = \{(\sigma,\Delta) | k-1 < \varPhi(S) \le k\}$ (геометрическая интерпретация классов), определяются в соответствии с функционалом (3).

Для *неколебательных* систем (случаи 1 и 7) функционал (3) представляется в виде

$$\varPhi(S) = -\frac{2a}{\sigma + \sqrt{\sigma^2 - 4\Delta}}, \tag{4}$$

а для *колебательных* систем (случай 10) с собственной частотой

$$\omega_c = 2\pi f_c = \sqrt{\Delta - \sigma^2/4} \tag{5}$$

в виде

$$\varPhi(S) = -\frac{1}{\sigma}\left[2a + (b - \frac{c\sigma}{2})\sqrt{4\Delta - \sigma^2}\right]. \tag{6}$$

Рассмотрим неравенство

$$\Phi(S) \le k. \tag{7}$$

Для *неколебательных* систем с учетом

$$-(\sigma + \sqrt{\sigma^2 - 4\Delta}) > 0$$

из (4) следует

$$2a \le -k(\sigma + \sqrt{\sigma^2 - 4\Delta})$$

или

$$-(2a + k\sigma) \ge k\sqrt{\sigma^2 - 4\Delta}). \tag{8}$$

Откуда из

$$k\sqrt{\sigma^2 - 4\Delta} \ge 0$$

следует

$$-(2a + k\sigma) \ge 0. \tag{9}$$

Соотношение (7) эквивалентно

$$(2a + k\sigma)^2 \ge k^2(\sigma^2 - 4\Delta).$$

Откуда

$$\Delta \ge -\left(\frac{a}{k}\right)\sigma - \left(\frac{a}{k}\right)^2. \tag{10}$$

Искомые области $D_к$ равных оценок приводятся на рис.1 $(\Delta \le \sigma^2/4)$.

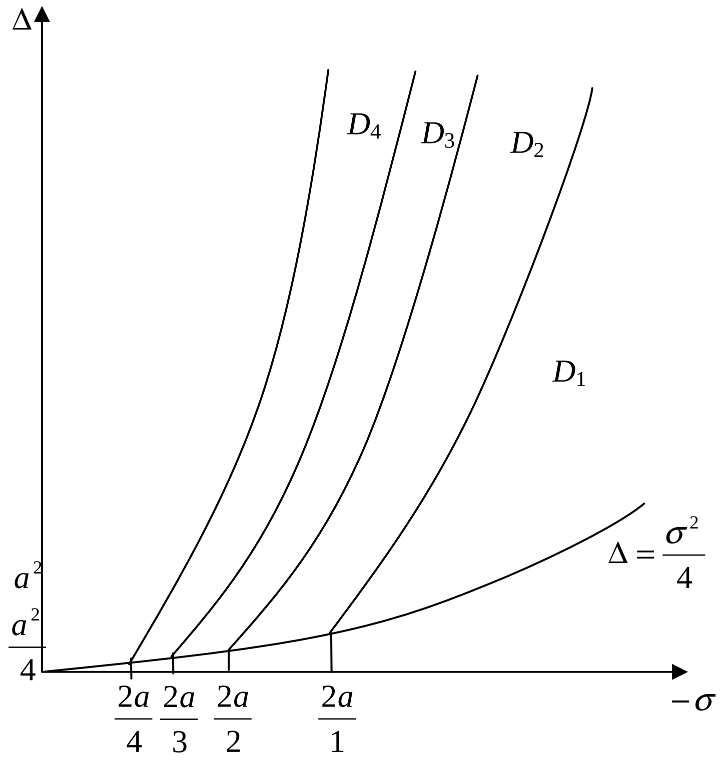

Рис.1.Области равных оценок для неколебательных систем

Для *колебательных систем* (7) имеет вид:

$$-\frac{1}{\sigma}\left[2a+(b-\frac{c\sigma}{2})\sqrt{4\Delta-\sigma^2}\right]\leq k\,.$$

С учетом $-\sigma > 0$ имеем:

$$2a+(b-\frac{c\sigma}{2})\sqrt{4\Delta-\sigma^2}\leq -k\sigma.$$

Откуда

$$\frac{1}{2}(2b-c\sigma)\sqrt{4\Delta-\sigma^2}\leq -(2a+k\sigma). \quad (11)$$

Справедливо

$$\frac{1}{2}(2b-c\sigma)\sqrt{4\Delta-\sigma^2}>0\,; \quad (12)$$

$$(\ b>0,\, c>0,\, \sigma<0;\, 4\Delta-\sigma^2>0;\, 2b-c\sigma>0\ )$$

Откуда следует

$$-(2a+k\sigma)>0,\, \sigma<-2\frac{a}{k},\, -\sigma>\frac{2a}{k}\,. \quad (13)$$

Соотношение (11) эквивалентно

$$4\Delta-\sigma^2\leq 4\left(\frac{2a+k\sigma}{2b-c\sigma}\right)^2,$$

или

$$\Delta \le \frac{\sigma^2}{4} + \left(\frac{2a + k\sigma}{2b - c\sigma}\right)^2 . \qquad (14)$$

В соответствии с (13), (14) области равных оценок (рис.2) для колебательных систем определятся границами:

- прямыми

$$-\sigma = \frac{2a}{k},$$

- кривыми

$$\Delta = \frac{1}{4}\sigma^2 + \left(\frac{2a + k\sigma}{2b - c\sigma}\right)^2 . \qquad (15)$$

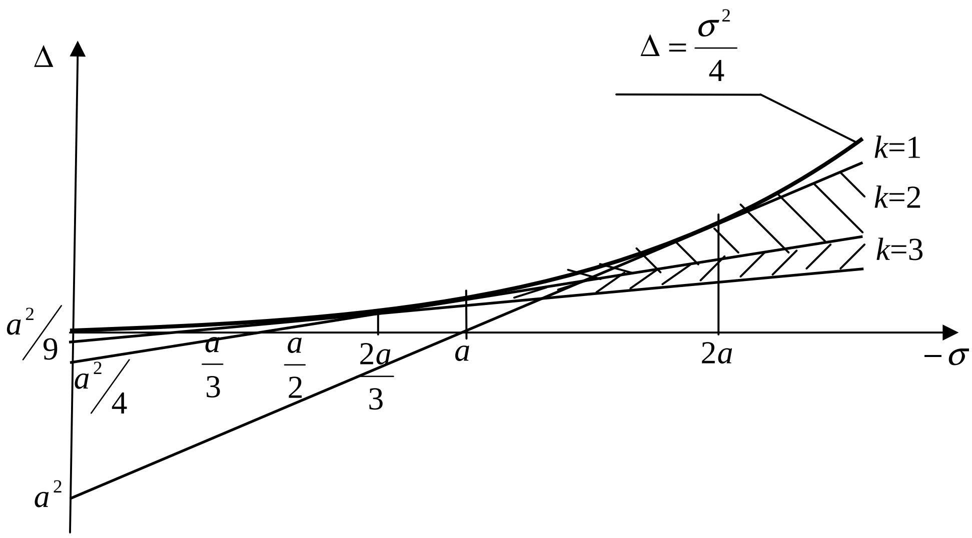

Рис.2. Области равных оценок для колебательных систем

Укажем и асимптотические представления неравенств (13), (14).

При $-\sigma \to 0$

$$\Delta \le \frac{a^2}{b^2}, \quad -\sigma > \frac{2a}{k}$$

При $-\sigma \to \infty$

$$\Delta \le \frac{(-\sigma)^2}{4} + \frac{\kappa^2}{c^2}. \qquad (16)$$

Далее из (14)

$$\Delta'_{-\sigma} = -\left[\frac{\sigma}{2} + 4\frac{(2a + k\sigma)(bk + ac)}{(2b - c\sigma)^3}\right],$$

откуда с учетом (12) и (13) следует

$$\Delta'_{-\sigma} > 0,$$

При $-\sigma > \frac{2a}{k}$ функция $\Delta(-\sigma)$ монотонно возрастает (рис. 1).

Займемся далее установлением областей равных оценок относительно *инвариантов*

$$\xi = -\frac{\sigma}{2\sqrt{\Delta}},\ \omega_c = \sqrt{\Delta - \frac{\sigma^2}{4}}. \tag{17}$$

Очевидны соотношения

$$\omega_c = \omega_0\sqrt{1-\xi^2}, \sigma = \frac{-2\xi\omega_c}{\sqrt{1-\xi^2}}\ , \omega_0 = \sqrt{\Delta}\ . \tag{18}$$

Из (13), (14) следует

$$\omega_c^2 \le \left(\frac{2a - \kappa\dfrac{2\xi\omega_c}{\sqrt{1-\xi^2}}}{2b + c\dfrac{2\xi\omega_c}{\sqrt{1-\xi^2}}} \right)^2,\ \ \omega_c^2 \le \left(\frac{a\sqrt{1-\xi^2} - \kappa\xi\omega_c}{b\sqrt{1-\xi^2} + c\xi\omega_c} \right)^2.$$

Откуда

$$\left| \frac{a\sqrt{1-\xi^2} - \kappa\xi\omega_c}{b\sqrt{1-\xi^2} + c\xi\omega_c} \right| \le \omega_c \le \left| \frac{a\sqrt{1-\xi^2} - \kappa\xi\omega_c}{b\sqrt{1-\xi^2} + c\xi\omega_c} \right|. \tag{19}$$

В силу $\omega_c > 0$ (19) равносильно

$$\omega_c \le \left| \frac{a\sqrt{1-\xi^2} - \kappa\xi\omega_c}{b\sqrt{1-\xi^2} + c\xi\omega_c} \right| \ \text{или}\ \ \omega_c \le \left| \frac{l - \delta\omega_c}{e + \phi\omega_c} \right|; \tag{20}$$

$$l = a\sqrt{1-\xi^2} > 0,\ \delta = k\xi > 0, e = b\sqrt{1-\xi^2} > 0,\quad \phi = c\xi > 0\ . \tag{21}$$

Рассмотрим неравенство

$$\left| \frac{l - \delta\omega_c}{e + \phi\omega_c} \right| < \omega_{c.}$$

Оно равносильно

$$-\omega_c < \frac{l - \delta\omega_c}{e + \phi\omega_c} < \omega_c \tag{22}$$

Тогда (20) удовлетворяется при

$$\frac{l - \delta\omega_c}{e + \phi\omega_c} < -\omega_c \ \text{или}\ \frac{l - \delta\omega_c}{e + \phi\omega_c} > \omega_c\ . \tag{23}$$

Из (23) следует

$$\phi\omega_c^2 + (e - \delta)\omega_c + l \le 0\,, \tag{24}$$

$$\phi\omega_c^2 + (e + \delta)\omega_c - l \le 0\,. \tag{25}$$

В силу ϕ >0 областью решения неравенства (24) (дискриминант $D = (e - \delta)^2 - 4\phi l > 0$)

будет $\omega_1 < \omega_c < \omega_2$ (при $D < 0$ решений нет); ω_1, ω_2 – корни трехчлена $\phi\omega_c^2 + (e - \delta)\omega_c + l$.

Аналогично для неравенства (25)

$$\Omega_1 < \omega_c < \Omega_2 .$$

Так как для рассматриваемых систем $\dfrac{l-\delta\omega_c}{e+\phi\omega_c} = \dfrac{2a+k\sigma}{2(b+c\xi\sqrt{\Delta})} < 0,$ то неравенство (25) решений не имеет, поэтому *областью решений* системы (24)-(25) будет *интервал* (ω_1, ω_2).

Полученные области использовались для объективизации оценки оператором характеристик объекта в процессе управления, а также для оценки имитационных характеристик тренажных и обучающих комплексов по подготовке операторов на основе данных нормального функционирования двух систем: оператор - реальный объект, оператор-модель объекта [6…12].

Список литературы

1. 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.
2. Будылина Е.А., Гарькина И.А., Данилов А.М., Пылайкин С.А. Аналитическое определение имитационных характеристик тренажных и обучающих комплексов // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 6 (часть 4). – С. 698-702.
3. Будылина Е.А., Данилов А.М., Пылайкин С.А., Лапшин Э.В. Тренажеры по подготовке операторов эргатических систем: состояние и перспективы // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 4; URL: www.science-education.ru/118-13874.
4. Гарькина И.А., Данилов А.М. Аппроксимационные задачи при разработке имитаторов транспортных систем: распараллеливание вычислительных процессов / Вестник Таджикского технического университета. –№ 4 (24). – 2013. –С.75-80.
5. Данилов А.М., Гарькина И.А., Домке Э.Р. Математическое и компьютерное моделирование сложных систем. – Пенза: ПГУАС. – 2011. – 296 с.
6. 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
7. Гарькина И.А., Данилов А.М., Прошин И.А. Тренажеры модульной архитектуры для подготовки операторов транспортных систем / XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего (плюс) Серия: технические науки. Машиностроение и информационные технологии. - №12(16). – 2013. –С. 37-42.

8. 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.

9. Гарькина И.А., Данилов А.М., Пылайкин С.А. Тренажеры и имитаторы транспортных систем: выбор параметров вычислений, оценка качества / Мир транспорта и технологических машин. –№3(42). –2013. –С.115-121.

10. Данилов А.М., Гарькина И.А., Гарькин И.Н. Управление объектами на подвижном основании: оптимизация конструктивной и структурной схем /Региональная архитектура и строительства. – 2014. -№3 (20). –С.102-108.

11. Данилов А.М., Гарькина И.А., Домке Э.Р. Математическое моделирование управляющих воздействий оператора в эргатической системе / Вестник МАДИ, №2. – 2011. –С.18-23

12. 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.

Рецензенты:

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

Кошев А.Н., д.х.н., профессор, профессор кафедры информационно-вычислительных систем Пензенского государственного университета архитектуры и строительства, г. Пенза.