УДК 629.7:656:51-7

КЛАССИФИКАЦИЯ ОБЪЕКТОВ ЭРГАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПО ИХ ДИНАМИЧЕСКИМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ

Гарькина И.А., Данилов А.М., Сорокин Д.С.

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 характеристик объекта в процессе нормального функционирования целостной человеко-машинной системы. Актуальность исследований определяется необходимостью получения требуемых имитационных характеристик тренажных и обучающих комплексов по подготовке операторов мобильных систем. Методика оценки основывается на специально разработанном функционале, позволяющем производить сравнение динамических характеристик двух систем: оператор – реальный объект и оператор - модель объекта. В функционале учитываются апериодичность или колебательность объекта, собственные частоты колебаний, безразмерные коэффициенты затухания, а также иные инварианты матрицы уравнений движения. С использованием функционала определены области равных оценок, позволяющие получить класс объекта при заданной балльности шкалы. Приводится практическая реализация методики.

Ключевые слова: эргатические системы, подготовка операторов, управляющие воздействия, связь с параметрами объекта, функционал качества, области равных оценок, классификация объектов, имитационные характеристики тренажеров.

HUMAN-MACHINE SYSTEM: CLASSIFICATION OF OBJECTS BY THEIR DYNAMIC CHARACTERISTICS

Garkina I.A., Danilov A.M., Sorokin D.S.

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

The technique of objective estimation of operator characteristics of the object in the normal functioning of the whole man-machine system is given. Relevance of the study is the need to obtain the required characteristics training systems for the preparation of operators of mobile systems. Assessment methodology is based on a specially developed functionals. It allows you to compare the dynamic characteristics of the two systems: the operator - the real object and the operator - the model object. In functional accounted aperiodicity or oscillating object, natural frequencies, damping dimensionless coefficients, and other invariants of matrix equations of motion. C using a functional defined on equal ratings. It is possible to establish the class of an object at a given scale. The practical implementation of the methodology is given.

Keywords: human-machine system, training of operators, control actions, relation to the parameters of the object, the functional quality, the field of equal ratings, classification of objects, simulation characteristics of simulators.

Известно, стиль управления оператора эргатической системы, описываемой уравнением движения

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

($x = (x_1, x_2, \ldots, x_n)^{\text{т}}$, $u = (u_1, u_2, \ldots, u_m)^{\text{т}}$ - вектор управления, $f(t) = (f_1(t), f_2(t), \ldots, f_s(t))^{\text{т}}$ - возмущающие воздействия), определяется собственными частотами колебаний и коэффициентами демпфирования объекта [10…15]. Поэтому актуальна объективизация оценки оператором управляемости объекта в процессе нормального функционирования целостной человеко-машинной системы [1…9]. Для классификации объектов воспользуемся функционалом

$$\Phi(\mathbf{S}) = -a\frac{1}{\max\limits_i \alpha_i} + b\max_i\left|\frac{\beta_i}{\alpha_i}\right| + c\max_i|\beta_i|,\ \Phi(S) \le k, \tag{1}$$

$\lambda_i = \alpha_i \pm j\beta_i$ - корни характеристического полинома; a, b, c - положительные весовые константы, k - класс объекта в заданной N-балльной шкале.

В частности, для систем второго порядка области равных оценок на плоскости ξ, ω_c определятся в виде:

$$\Omega_k = \{(\xi, \omega_c) \mid \Phi(S) < k\}$$

для *колебательных систем* относительно инвариантов

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

(σ - след матрицы $trA = \sum_i a_{ii}$, $\Delta = |A|$; $\xi > 0$, $\Delta > 0$ (устойчивость), $\xi < 1$ (колебательность), для рассматриваемых систем $\Phi(S) > 0$).

Из $\Phi(S) < k$ следует:

$$\sqrt{\Delta - \frac{\sigma^2}{4}} < \frac{2a + \kappa\sigma}{c\sigma - 2b}$$

или

$$\omega_c^2 - \frac{k - b\text{æ}}{\text{c}}\omega_c + \frac{a}{c}\text{æ} < 0, \text{æ} = \sqrt{\frac{1}{\xi^2} - 1}.$$

При фиксированном æ справедливо:

$$\omega_1 < \omega_c < \omega_2,$$

$$\omega_1 = \frac{1}{2c}(k - b\text{æ} - \sqrt{(k\text{-}b\text{æ})^2 - 4ac\text{æ}}),$$

$$\omega_2 = \frac{1}{2c}(k - b\text{æ} + \sqrt{(k\text{-}b\text{æ})^2 - 4ac\text{æ}}).$$

Так как $\omega_c > 0$ и $4ac\text{æ} > 0$, то из выражений для ω_1, ω_2 и двойного неравенства $\omega_c < \omega_c < \omega_2$ получим:

$$k - b\text{æ} > 0.$$

Таким образом, области Ω_k на плоскости $\{\xi, \omega_c\}$ определятся системой неравенств:

$$\begin{aligned}
&0 < \xi < 1,\\
&k - b\text{æ} > 0,\\
&(k\text{-}b\text{æ})^2 > 4ac\text{æ},\\
&\omega_1 < \omega_c < \omega_2
\end{aligned}$$

а области D_k соотношениями

$$D_1 = \Omega_1,\ D_к = \Omega_k - \overline{\Omega}_{k-1},\ k = 2,3\ldots .$$

Здесь $\overline{\Omega}_k$ -множество на плоскости $\{\xi, \omega_c\}$, определяемое системой неравенств

$$\begin{aligned}
&0 < \xi < 1,\\
&k - bæ > 0,\\
&(k - \mathrm{b}æ)^2 \ge 4acæ,\\
&\omega_1 \le \omega_c \le \omega_2 .
\end{aligned}$$

Для описания множеств Ω_k и областей D_k изучим поведение ω_1 и ω_2 как функций двух переменных k и $æ$.

Меньший корень $æ_{k1}$ уравнения

$$(k - bæ)^2 - 4acæ = 0$$

соответствует большему корню ξ_{k2} и возрастает с возрастанием k (непосредственно следует из уравнения и соотношения $æ = \sqrt{\frac{1}{\xi^2} - 1})$.

Справедливо

$$(\omega_1)_k^{'} = \frac{1}{2c}\left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{4acæ}{(k - bæ)^2}}}\right) < 0,\ k \ge 1;$$

$$(\omega_2)_k^{'} = \frac{1}{2c}\left(1 + \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{4acæ}{(k - bæ)^2}}}\right) > 0,\ k \ge 1.$$

Откуда следует $\Omega_k \supset \Omega_{k-1}$.

Из выражений для ω_1, ω_2 и установленного выше неравенства $k - bæ > 0$ следует

$$\omega_1 \ge 0, \omega_2 \ge 0 \text{ при } k \ge 1, æ \ge 0 .$$

При $æ = 0$ ($\xi = 1$) имеем:

$$\omega_1 = 0, \omega_2 = \frac{k}{c}.$$

Нижняя граница области Ω_k возрастает с возрастанием $æ$ (убывает с возрастанием ξ):

$$(\omega_1)_æ^{'} = \frac{b}{2c}\left(-1 + \frac{1 + \frac{2ac}{b(k - bæ)}}{\sqrt{1 - \frac{4acæ}{(k - bæ)^2}}}\right) > 0 .$$

$$(\omega_2)_æ^{'} = -\frac{b}{2c}\left(1 + \frac{1 - \frac{2ac}{b(k - bæ)}}{\sqrt{1 - \frac{4acæ}{(k - bæ)^2}}}\right) .$$

Если для функционала $2\frac{2ac}{b} >> 2$, то при малых $æ$ и при k таких, что $\frac{2ac}{bk} > 2$ (то есть при ξ, близких к 1) справедливо $(\omega_2)_æ^{'} > 0$, и верхняя граница Ω_k возрастает по $æ$ (убывает по ξ) при æ, близких к нулю (при ξ, близких к 1); при æ, близких к корню $æ_{k1}$ (при ξ, близких к корню ξ_{k2}) имеет место $(\omega_2)'_{æ} < 0$.

Области Ω_k (соответственно D_k) представлены на рис.1.

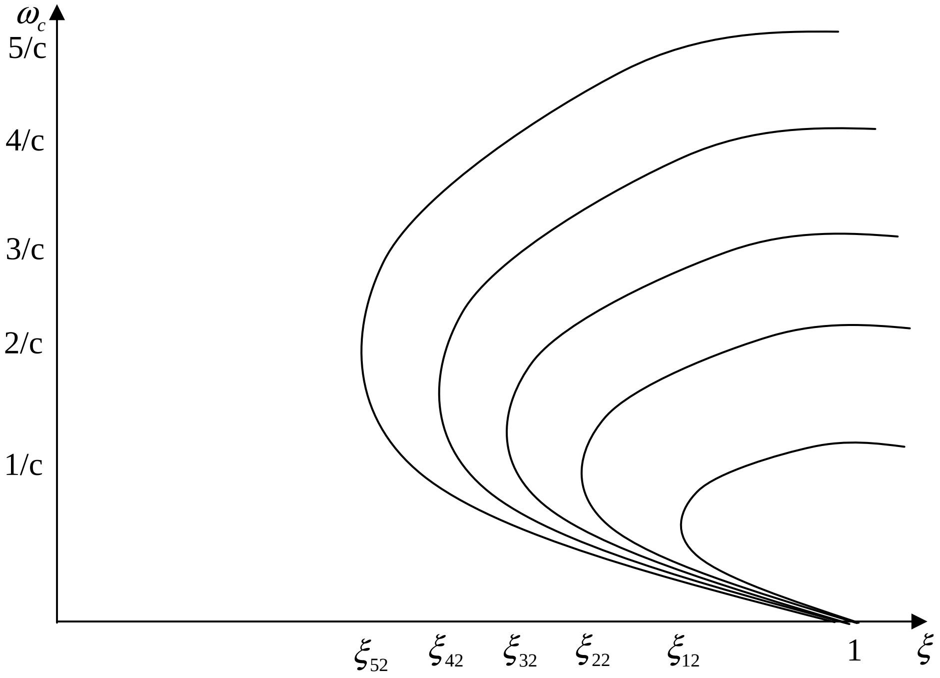

Рис.1. Области Ω_k

Рассмотрим далее *неколебательные системы* ($\sigma^2 - 4\Delta \geq 0$).

Прежде всего отметим, для каждой из компонент $x = (\omega_z, \alpha)^{\text{т}} = (x_1, x_2)^{\text{т}}$ справедливо

$$\ddot{x}_i - \sigma\dot{x}_i + \Delta x_i = 0; i = 1{,}2\,,$$

$$\ddot{x}_i + 2n\dot{x}_i + \omega_0^2 x_i = 0\,,$$

$$T^2\ddot{x}_i^2 + 2\xi T\dot{x}_i + x_i = 0\,,$$

так что

$$T = \frac{1}{\omega_0} = \frac{1}{\sqrt{\Delta}}, \xi = \frac{n}{\omega_0} = -\frac{\sigma}{2\sqrt{\Delta}},\ \Delta = \omega_0^2,\ \sigma = -2\xi\omega_0\,.$$

Определим области равных оценок относительно инвариантов ξ и $\omega_0 = T^{-1}$.

Подставляя в $-(2a + k\sigma) \geq 0$ и $(2a + k\sigma)^2 \geq k^2(\sigma^2 - 4\Delta)$ значения Δ и σ через ξ и ω_0, получим

$$2a - 2k\xi\omega_0 \leq 0\,;\ \omega_0^2 \geq \frac{a}{k}2\xi\omega_0 - \left(\frac{a}{k}\right)^2.$$

Откуда

$$\omega_0 \geq \frac{a}{k}\cdot\frac{1}{\xi} \tag{2}$$

$$\omega_0^2 - \frac{2a\xi}{k}\omega_0 + \frac{a^2}{k^2} \geq 0 \tag{3}$$

Для неравенства (3) в силу $\xi^2 > 1$ дискриминант

$$D = 4\frac{a^2}{k^2}(\xi^2 - 1) > 0\,.$$

Поэтому (3) выполняется при

$$\omega_0 < \omega_1\,, \tag{4}$$

$$\omega_0 > \omega_2\,, \tag{5}$$

то есть вне отрезка (ω_1, ω_2), где $\omega_1 < \omega_2$ - корни трехчлена

$$\omega_0^2 - \frac{2a\xi}{k}\omega_0 + \frac{a^2}{k^2}\,,$$

$$\omega_1 = \frac{a}{k}\left(\xi - \sqrt{\xi^2 - 1}\right),\;\; \omega_2 = \frac{a}{k}\left(\xi + \sqrt{\xi^2 - 1}\right).$$

Отметим

$$\xi - \sqrt{\xi^2 - 1} < \frac{1}{\xi}$$

для всех $\xi > 1$.

Действительно, если бы было

$$\sqrt{\xi^2 - 1} < \xi - \frac{1}{k}\,,$$

то из этого следовало бы

$$\sqrt{\xi^2 - 1} < \xi - \frac{1}{\xi}\,.$$

Так как $\xi > \dfrac{1}{\xi}$, то

$$\xi\sqrt{\xi^2 - 1} < \xi^2 - 1,\;\; \xi^2(\xi^2 - 1) < (\xi^2 - 1)^2,\;\; \xi^2 < \xi^2 - 1\,.$$

Полученное противоречие свидетельствует о справедливости (5) для всех $\xi > 1$.

Поэтому неравенства (2) и (4) несовместимы.

С другой стороны при всех $\xi > 1$

$$\xi + \sqrt{\xi^2 - 1} > \frac{1}{\xi}\,,$$

так как

$$\sqrt{\xi^2 - 1} > \frac{1}{\xi} - \xi$$

при всех ξ в силу

$$\frac{1}{\xi} - \xi < 0\,.$$

Таким образом, область решения системы неравенств (2) и (4) совпадает с областью решения неравенства (4). Поэтому для построения областей равных оценок достаточно построить лишь кривые

$$\omega_0 = \frac{a}{k}\left(\xi + \sqrt{\xi^2 - 1}\right);$$

$\omega_0 \approx \dfrac{2a}{k}\xi$ при $\xi^2 >> 1$ (области равных оценок приводятся на рис.2).

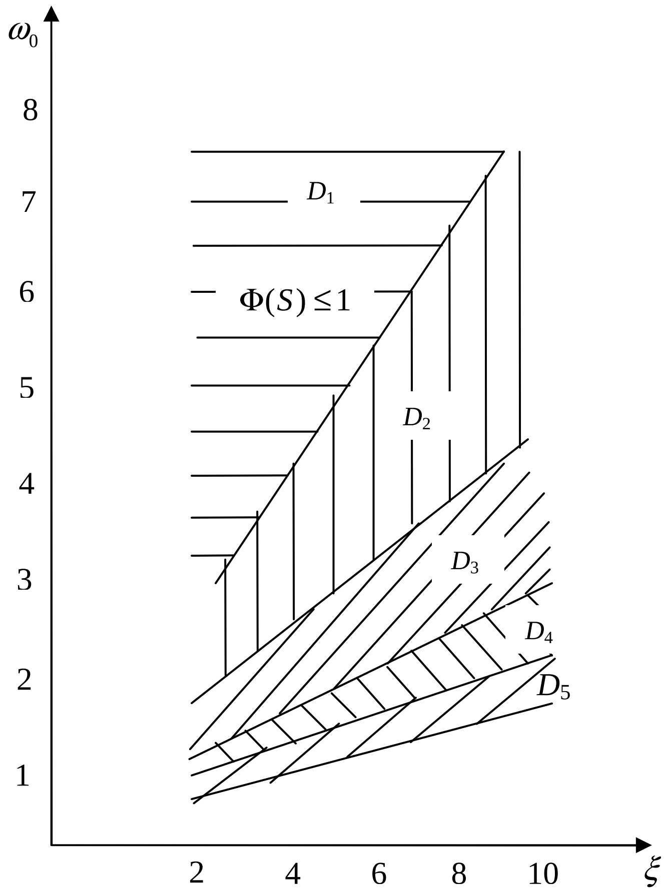

Рис.2. Аппроксимация областей равных оценок

Полученная методика многократно использовалась для оценки психофизиологической напряженности человека-оператора при управлении объектом, а также для оценки имитационных характеристик тренажных и обучающих комплексов, используемых для подготовки операторов транспортных систем [1…3,14].

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. 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.

4. 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.

5. 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.

6. Данилов А.М., Гарькина И.А., Домке Э.Р. Математическое и компьютерное моделирование сложных систем. – Пенза: ПГУАС. – 2011. – 296 с.

7. Гарькина И.А., Данилов А.М., Домке Э.Р. Промышленные приложения системных методологий, теорий идентификации и управления / Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2009. – № 2. – С. 77-81.

8. 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.

9. 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.

10. 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.

11. 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.

12. 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.

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

14. 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.

15. Планирование эксперимента. Обработка опытных данных: монография / И.А.Гарькина [и др.]; под ред. проф. А.М.Данилова. – М.: Палеотип. – 2005. – 272 с.

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.