УДК 656:51-7

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИМИТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРЕНАЖНЫХ И ОБУЧАЮЩИХ КОМПЛЕКСОВ

[1]Будылина Е.А., [2]Гарькина И.А., [2]Данилов А.М., [2]Пылайкин С.А.

[1]Московский государственный университет машиностроения, Москва, e-mail: bud-ea@yandex.ru;
[2]ФГБОУ ВПО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства», Пенза, e-mail: fmatem@pguas.ru

Предлагаются аналитические методы оценки имитационных характеристик тренажных и обучающих комплексов для подготовки операторов транспортных (авиационных, наземных, надводных) эргатических систем. Производится классификация рассматриваемых линейных стационарных систем. Приводятся структура и вид специально разработанных функционалов качества, позволяющих объективизировать оценку оператором технических характеристик, как апериодических, так и колебательных объектов управления (с учетом взаимодействия оператора и объекта). Определяются параметры оптимальной обратной связи (для системы уравнений второго порядка приводится алгоритм построения оптимальной матрицы обратной связи), качества объекта управления, стиля управления, классности оператора. Предлагается методика объективизации оценки оператором характеристик объекта управления. Рассматриваются возможности упрощения вычислительных задач при анализе систем. Результаты исследований прошли практическую апробацию при разработке тренажеров различных транспортных систем.

Ключевые слова: транспортные средства, подготовка операторов, тренажные и обучающие комплексы, имитационные характеристики, объективная оценка.

ANALYTICAL DETERMINATION OF SIMULATION CHARACTERISTICS TRAINING AND EDUCATIONAL COMPLEXES

[1]Budylina E.A., [2]Garkina I.A., [2]Danilov A.M., [2]Pylaykin S.A.

[1]Moscow state university of mechanical engineering, Moscow, e-mail: bud-ea@yandex.ru;
[2]Penza state university of architecture and construction, Penza, e-mail: regas@pguas.ru

Analytical methods of evaluation of simulation characteristics of both training and learning systems for the training of operators of transport (air, land, surface) ergatic systems are offered. The classification of linear time-invariant systems under consideration is given. The structure and form of specially designed functionals of quality are offered. They give the possibility to determine how the operator assesses the technical characteristics of the objects of control (aperiodic and vibrational) taking into account the interaction between the operator and the object. Defined the parameters of the optimal feedback (for the system of equations of the second order the algorithm of creation of the optimal feedback matrix is given), of quality of the object of control, style of control, the class of operator. A technique is proposed,which allows to find out objectively, as the operator assesses the characteristics of the object of control. Possibilities are considered simplify computing tasks in the analysis of systems. The research results were practical approbation by development of simulators of different transport systems.

Keywords: vehicles, training of operators, simulators and training systems, simulation characteristics, objective assessment

При разработке имитаторов различных мобильных систем актуальным является решение задач формирования у операторов необходимых навыков управления, оценки стиля управления, классности оператора, оценки оператором технических характеристик объекта с точки зрения управляемости и т.д. [1–3]. Традиционно эти вопросы решаются с привлечением экспертов. Чтобы избежать присущих при этом элементов субъективности, в работе рассматривается объективизация указанных оценок. Полученные результаты могут использоваться как при разработке технических требований, так и проектировании и оценке имитационных характеристик тренажеров мобильных систем.

Ограничимся рассмотрением систем, описываемых в виде:

$$\dot{x} = \mathbf{A}x(t) + \mathbf{B}u(t) + \mathbf{f}(t), \qquad (1)$$

где $x = (x_1, x_2, \ldots, x_n)^{\text{т}}$ – выходной вектор; $u = (u_1, u_2, \ldots, u_m)^{\text{т}}$ – вектор управления; $\mathbf{f}(t)$ – вектор-столбец случайных возмущений, внешних по отношению к объекту управления (известны лишь некоторые статистические характеристики); $\mathbf{A} = (a_{ij})$ – матрица (основная) системы размерности $n \times n$; $\mathbf{B} = (b_{ij})$ – матрица управления размерности $n \times m$.

Предполагается, что матрицами **A, B** полностью определяется объект управления, а также возможность достижения эталонным (идеальным) оператором необходимых параметров управления. В качестве основного режима функционирования системы (1) рассматривается $x(t) \equiv 0$. Управляющий сигнал $u(t)$ формируется на основе наблюдений отклонений $x_i(t)$ от основного режима. Для реальных систем энергия управляющих воздействий ограничена и достаточно мала (норма вектора управления $\left\|u\left(t\right)\right\| \le \delta$). Для каждой конкретной системы δ задается, исходя из технических возможностей системы, *a priori*. Величина отклонений ε от основного режима предполагается также малой ($\left\|u\left(t\right)\right\| \le \varepsilon$) и задается *a priori.* Для линейных стационарных эргатических систем $u(t) = \mathbf{P}x(t)$, $\mathbf{P} = (p_{ij})$ – матрица обратной связи размерности $m \times n$.

Ретроспективный анализ данных нормальной эксплуатации рассматриваемых систем показал [4–6], что управляющие воздействия по каждому из каналов управления сосредоточены около одной характерной частоты (оператор воспринимает объект как усилительное безинерционное звено с чистым запаздыванием (согласуется с полученными по данным нормальной эксплуатации амплитудно- и фазо-частотными характеристиками)). Непосредственно из свойств нормы матрицы следует $\left\|\mathbf{P}x\right\| \le \left\|\mathbf{P}\right\| \cdot \left\|x\right\|$; равенство может достигаться на любом шаре $\left\|x\right\| \le \varepsilon$. Откуда $\left\|\mathbf{P}\right\| \le M = \frac{\delta}{\varepsilon}$.

Таким образом, линейная *стационарная эргатическая система* описывается векторным уравнением

$$\dot{x} = \left(\mathbf{A} + \mathbf{BP}\right)x\left(t\right) + \mathbf{f}\left(t\right). \qquad (2)$$

Дадим классификацию систем (1), (2). Для этого прежде всего определим структуру и вид функционала для оценки качества переходных процессов в асимптотически устойчивой линейной системе

$$\dot{y} = \mathbf{S}y\left(t\right) + \mathbf{f}\left(t\right) \qquad (3)$$

(при $u \equiv 0$ (1) сведется к (3)). Пусть $\lambda_i, i = \overline{1,n}$ – собственные числа матрицы S. Асимптотическая устойчивость системы (3) эквивалентна выполнению условий: $\operatorname{Re}\lambda_i < 0 \quad \forall i$. Так как предполагается асимптотическая устойчивость основного режима в системах стабилизации, то и (2) сводится к (3). Нетрудно видеть, что длительность переходных процессов в рассматриваемой системе определяется численным значением $\Phi_1\left(\mathbf{S}\right) = -\frac{1}{\max\limits_i \operatorname{Re}\lambda_i}$, а колебательные процессы в системе – $\Phi_2\left(\mathbf{S}\right) = \max\limits_i \left|\frac{\operatorname{Im}\lambda_i}{\operatorname{Re}\lambda_i}\right|$; $\Phi_3\left(\mathbf{S}\right) = \max\limits_i \left|\operatorname{Im}\lambda_i\right|$. Поэтому естественно определять качество системы, исходя из численных значений функционала

$$\Phi\left(\mathbf{S}\right) = -\frac{1}{\max\limits_i \operatorname{Re}\lambda_i} + k_0 \max\limits_i \left|\frac{\operatorname{Im}\lambda_i}{\operatorname{Re}\lambda_i}\right| + k_a \max\limits_i \operatorname{Im}\lambda_i,$$

где k_0, k_a – весовые константы.

Оптимальная обратная связь в системе определится матрицей $\mathbf{P}_{м}$, удовлетворяющей условию:

$$\Phi\left(\mathbf{A} + \mathbf{BP}_{м}\right) = \min\limits_{\|\mathbf{P}\| \le M} \Phi\left(\mathbf{A} + \mathbf{BP}\right).$$

Отметим, качество системы $\dot{x} = \mathbf{A}x(t)$ характеризуется численным значением $K_A = \Phi(\mathbf{A})$.

Качество объекта управления в (1) определится значением $K_{AB} = \Phi(\mathbf{A} + \mathbf{BP}_{м})$.

Взаимодействие оператора и объекта, то есть *качество целостной эргатической системы* (2), определится по значению

$$K_{ABP} = \frac{\Phi\left(\mathbf{A} + \mathbf{BP}\right)}{\Phi\left(\mathbf{A} + \mathbf{BP}_{м}\right)} + \Phi\left(\mathbf{A} + \mathbf{BP}\right) - \Phi\left(\mathbf{A} + \mathbf{BP}_{м}\right).$$

Предполагается, что $\boldsymbol{P}$ удовлетворяет условию $\left\|\mathbf{P}\right\| \le M$; идентификацию матрицы $\boldsymbol{P}$ можно произвести по известным методам на основе данных нормальной эксплуатации.

Стиль управления оператора оценивается по разбросу $K_{up} = \max\limits_t \left\|u\left(t\right) - \mathbf{P}x\left(t\right)\right\|$ значений $u(t)$.

Классность оператора определится численным значением $K_u = K_{up} + K_{ABP}$. Среднее значение K_u для группы операторов (K_u^c) характеризует простоту (сложность) управления объектом. Для объектов с требуемыми характеристиками K_u^c должно быть близким к нулю (усреднение по группе квалифицированных операторов).

Полученные выше классификации систем стабилизации (по K_A, K_{AB}); эргатической системы (по K_{ABP}, K_u^c); оператора (по K_u; характеризует стиль управления) являются *непрерывными*. Для реальных систем области значений функций K_A, K_{AB}, K_{ABP}, K_u,

K_u^c ограничены; так что все реальные системы можно разбить на конечное число классов.

Исследования систем (1)–(3) будут тем проще, чем проще их аналитические структуры. В связи с этим рассмотрим возможности упрощения вычислительных задач при анализе этих систем. Для упрощения структур матриц $\boldsymbol{A}$ и $\boldsymbol{B}$ рассмотрим два преобразования. Первое из них целесообразно использовать при определении оптимальной матрицы обратной связи. С физической точки зрения оно состоит в выборе новых входных каналов (линейная комбинация старых), минимально связанных между собой. Второе преобразование – аналогично первому и состоит в перегруппировке выходных каналов.

Подход проиллюстрируем на примере системы второго порядка (увеличение порядка, не меняя сути, лишь усложняет техническую реализацию). Здесь:

$$\dot{x} = \mathbf{A}x(t) + \mathbf{B}u(t) + \mathbf{f}(t);$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}; \mathbf{B} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix}; \mathbf{f} = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Первое преобразование можно рассматривать как каноническое по входным переменным (по управлению). Если хотя бы одно из чисел b_1, b_2 не равно нулю, то матрицу $\mathbf{B}$ можно записать виде $\tilde{\mathbf{B}} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$. Действительно, при $b_1 \neq 0$, $b_2 = 0$ обозначим $b_1 u$ снова через u; если $b_1 = 0$, $b_2 \neq 0$, то обозначим $b_2 u$ через u, перенумеруем уравнения и координаты x_1, x_2 системы. Каноническим видом матрицы $\mathbf{B}$ будет вектор-столбец $\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$. Изменив масштаб, коэффициент усиления всегда можно привести к 1. Если ни одно из чисел b_1, b_2 не является нулем, то каноническое по управлению представление можно получить, используя невырожденное линейное преобразование с матрицей $\mathbf{C}$:

$$\dot{x} = \mathbf{C}y; \quad \dot{y} = \mathbf{C}^{-1}\mathbf{AC}y + \mathbf{C}^{-1}\mathbf{B}u + \mathbf{C}^{-1}f \quad (5)$$

(из невырожденности матрицы $\mathbf{C}$ следует наблюдаемость системы).

Вид матрицы $\mathbf{C}^{-1}\mathbf{B}$ зависит от выбора матрицы $\mathbf{C}$. В частности: $\mathbf{C}^{-1}\mathbf{B} = \begin{bmatrix} b_1 \\ 0 \end{bmatrix}$, если $\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{b_2}{b_1} & 1 \end{bmatrix}$. Произведя масштабирование u, получим канонический вид $\tilde{\mathbf{B}} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$. При выборе матрицы $\boldsymbol{C}$ возможен некоторый произвол (два свободных параметра). Таким образом, в общем случае *каноническое по управлению представление* системы (4) будет иметь вид

$$\begin{cases} \dot{y} = \mathbf{D}y + \mathbf{B}u + \tilde{\mathbf{f}} \\ x = \mathbf{C}y \end{cases}; \quad \mathbf{D} = \mathbf{C}^{-1}\mathbf{AC};$$

$$\tilde{\mathbf{B}} = \mathbf{C}^{-1}\mathbf{A}; \quad \tilde{\mathbf{f}} = \mathbf{C}^{-1}\mathbf{f}. \quad (6)$$

Собственные числа матриц $\mathbf{A}$ и $\mathbf{D}$ одинаковы (следует из общей теории линейных операторов: матрицы $\mathbf{A}$ и $\mathbf{D}$ – подобны). Имеем:

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \mu & 1 \end{bmatrix}; \quad \mu = \frac{b_2}{b_1}; \quad d_{12} = a_{12};$$

$$d_{21} = a_{21} - \mu(a_{11} - a_{22}) - \mu^2 a_{12};$$

$$d_{22} = a_{22} - \mu a_{12}. \quad (7)$$

Рассмотрим далее *второе преобразование*. Возможны три принципиально различных случая.

1. λ_1, λ_2 – вещественные собственные числа матрицы $\mathbf{A}$ и им соответствуют два линейно независимых вектора (в случае $\lambda_1 \equiv \lambda_2 \equiv \lambda$ имеем $rang(\mathbf{A} - \lambda\mathbf{I}) = 0$).

Пусть $e_1 = (q_1^1, q_2^1)$, $e_2 = (q_1^2, q_2^2)$ – собственные векторы; $\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} q_1^1 & q_1^2 \\ q_1^2 & q_2^2 \end{bmatrix}$.

Заменой $x = \mathbf{Q}y$ систему (4) приведем к виду

$$\dot{y} = \mathbf{\Lambda}y + \mathbf{B}_1 u + \mathbf{f}_1; \quad \mathbf{\Lambda} = \mathbf{Q}^{-1}\mathbf{AQ} = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{B}_1 = \mathbf{Q}^{-1}\mathbf{B}; \quad \mathbf{f}_1 = \mathbf{Q}^{-1}\mathbf{f}. \quad (8)$$

В (8) возможны случаи:

1) $\lambda_1 < 0$, $\lambda_2 < 0$;
2) $\lambda_1 < 0$, $\lambda_2 > 0$;
3) $\lambda_1 > 0$, $\lambda_2 < 0$;
4) $\lambda_1 = 0$, $\lambda_2 < 0$;
5) $\lambda_1 = 0$, $\lambda_2 > 0$;
6) $\lambda_1 = 0$, $\lambda_2 = 0$

(учтена возможность перенумерации λ_1, λ_2).

2. Если $\lambda_1 \equiv \lambda_2 \equiv \lambda$ и $rang(\mathbf{A} - \lambda\mathbf{I}) = 1$, преобразование $\mathbf{Q}$ определится через собственный вектор e_1 и присоединенный e_2: $(\mathbf{A} - \lambda\mathbf{I})e_2 = e_1$. При этом матрица (ос-

новная) системы преобразуется к виду $\mathbf{\Lambda} = \begin{bmatrix} \lambda & 1 \\ 0 & \lambda \end{bmatrix}$.

Качественно различных систем здесь три:

7) $\lambda < 0$;

8) $\lambda < 0$;

9) $\lambda = 0$;

(6) и (9) отличаются структурой матрицы $\mathbf{\Lambda}$.

3. λ_1, λ_2 – комплексно сопряженные. Систему (4) можно записать в виде (8), но уже в комплексифицированном пространстве.

Качественно различных систем здесь три:

10) $\mathrm{Re}\lambda_i < 0$;

11) $\mathrm{Re}\lambda_i > 0$;

12) $\mathrm{Re}\lambda_i = 0$.

Указанные типы систем опишем в терминах коэффициентов матрицы $\mathbf{A}$, точнее, через инварианты $\sigma = a_{11} + a_{22}$ и $\Delta = a_{11}a_{22} - a_{21}a_{12}$.

В первом случае λ_1, λ_2 – вещественные (если $\lambda_1 = \lambda_2$, то должно быть $a_{12} = a_{21} = 0$):

1) $\lambda_1 < 0$, $\lambda_2 < 0$ эквивалентно $\sigma < 0$, $\sigma^2 \geq 4\Delta > 0$;

2) $\lambda_1 < 0$, $\lambda_2 > 0$ эквивалентно $\sigma < 0$, $\Delta < 0$;

3) $\lambda_1 > 0$, $\lambda_2 > 0$ эквивалентно $\sigma > 0$, $\sigma^2 \geq 4\Delta > 0$;

4) $\lambda_1 = 0$, $\lambda_2 < 0$ эквивалентно $\sigma < 0$, $\Delta = 0$;

5) $\lambda_1 = 0$, $\lambda_2 > 0$ эквивалентно $\sigma > 0$, $\Delta = 0$;

6) $\lambda_1 = 0$, $\lambda_2 = 0$ эквивалентно $\sigma = 0$, $\Delta = 0$.

Во втором случае $\lambda_1 \equiv \lambda_2 \equiv \lambda$; $a_{12}^2 + a_{22}^2 > 0$, $\sigma^2 = 4\Delta$:

7) $\lambda < 0$ эквивалентно $\sigma < 0$;

8) $\lambda > 0$ эквивалентно $\sigma > 0$;

9) $\lambda = 0$ эквивалентно $\sigma = 0$.

В третьем случае λ_1, λ_2 – комплексно-сопряженные, $\sigma^2 <$:

10) $\mathrm{Re}\lambda_i < 0$ эквивалентно $\sigma < 0$;

11) $\mathrm{Re}\lambda_i > 0$ эквивалентно $\sigma > 0$;

12) $\mathrm{Re}\lambda_i = 0$ эквивалентно $\sigma = 0$.

Отметим, что приведенная классификация систем по матрице $\mathbf{A}$ хоть и грубая, но связана с устойчивостью и неустойчивостью нулевого решения (принципиальная и важная классификация) системы $\dot{z} = \mathbf{A}z$.

Для иллюстрации приведем *алгоритм построения оптимальной матрицы обратной связи* для системы уравнений второго порядка. Аналогична и общая схема построения таких матриц для произвольных конечномерных систем (технические трудности при этом, естественно, возрастают). После преобразования, канонического по управлению, от системы (4) (общего вида) приходим к системе

$$\dot{y}_1 = d_{11}y_1 + d_{12}y_2 + u + \tilde{\mathbf{f}}_1;$$

$$\dot{y}_2 = d_{21}y_2 + d_{22}y_2 + \tilde{\mathbf{f}}_2.$$

Справедливо:

$$d_{11} = a_{11} + \mu a_{12};\ \ d_{12} = a_{12};$$

$$d_{21} = a_{21} - \mu\left(a_{11} - a_{22}\right) - \mu^2 a_{12};$$

$$d_{22} = a_{22} - \mu a_{12};\ \ \mu = \frac{b_2}{b_1};\ \ b_1 \neq 0. \quad (9)$$

При $b_1 = 0$: $d_{11} = a_{22}$, $d_{12} = a_{21}$, $d_{21} = a_{12}$, $d_{22} = a_{11}$.

Параметры p и q оптимальной матрицы обратной связи $\tilde{\mathbf{P}}_{\text{м}} = \left[p\ q\right]$ должны выбираться из условий минимума функционала $F\left(p, q\right) = \Phi\left(\mathbf{D} + \tilde{\mathbf{B}}\tilde{\mathbf{P}}_{\text{м}}\right)$ (собственные числа матрицы $\mathbf{D} + \tilde{\mathbf{B}}\tilde{\mathbf{P}}_{\text{м}}$ подставляются в функционал Φ, а затем p и q выбираются из условия минимума Φ).

Имеем:

$$u = py_1 + qy_{2\text{м}} = \tilde{\mathbf{P}}\ y;$$

$$\mathbf{D} + \tilde{\mathbf{B}}\tilde{\mathbf{P}}_{\text{м}} = \begin{bmatrix} d_{11} + p & d_{12} + q \\ d_{21} & d_{22} \end{bmatrix}; \quad (10)$$

$$\lambda = \frac{1}{2}\left(\sigma + p \pm \sqrt{\left(\sigma + p\right)^2 - 4\left(\Delta + pd_{22} - qd_{21}\right)}\right)$$

– собственные числа матрицы $\mathbf{D} + \tilde{\mathbf{B}}\tilde{\mathbf{P}}_{\text{м}}$ (σ и Δ – след и определитель матрицы $\mathbf{A}$ совпадают со следом σ_1 и определителем Δ_1 матрицы $\mathbf{D}$, как инварианты при невырожденных преобразованиях координат).

Приходим к задаче минимизации функции $F\left(p, q\right) = \mathbf{\Phi}\left(\mathbf{D} + \tilde{\mathbf{B}}\tilde{\mathbf{P}}_{\text{м}}\right)$ при ограничениях на координаты $x_i : \left|x_i\right| \leq \varepsilon$ и энергию управляющих воздействий $\left|u\right| \leq \delta$:

$$\left|p\right| \leq \frac{\delta}{\varepsilon};\ \ \left|q\right| \leq \frac{\delta}{\varepsilon}. \quad (11)$$

При выборе p и q величины $\sigma + p$ и $d\left(p, q\right) = \left|\left(\left(\sigma + p\right)^2 - 4\left(\Delta + pd_{22} - qd_{21}\right)\right)\right|$ предполагаются наименьшими. Задача легко решается для систем, если коэффициент d_{22} по абсолютной величине мал по сравнению с $\left|d_{21}\right|$. Алгоритм минимизации функции $F(p, q)$ при условии (11) значительно упрощается: $\sigma + p$ минимизируется при $p = -\frac{\delta}{\varepsilon}$; если при выбранном q значение $d(p, q)$ можно сделать равным нулю, то задача решена, если нет, то выбрав шаг $0 < h \le \frac{\delta}{2\varepsilon}$, следует минимизировать $d(p, q)$, осуществляя выбор q для значений

$$p = p_k = -\frac{\delta}{\varepsilon} + kh; \quad k = 0, 1, 2, \ldots,$$

$$\left(kh \le \frac{2\delta}{\varepsilon}\right).$$

Наконец, приведем *методику объективизации оценки оператором характеристик объекта управления*. Ясно, что имеет смысл рассматривать лишь экспоненциально устойчивые системы с инвариантами, удовлетворяющими условиям $\sigma < 0, \Delta > 0$ (из двенадцати типов систем второго порядка их будет три). Непосредственно из физического смысла функционала $\Phi(\mathbf{S})$ следует: *система S тем лучше, чем меньше* $\Phi(\mathbf{S})$. Тогда в N-балльной шкале система (3) отнесется к классу k с оценкой $\Phi(\mathbf{S})$, если $k - 1 < \Phi(\mathbf{S}) \le k, k = \overline{1, N}$.

Области

$$D_k = \left\{(\lambda_1, \ldots, \lambda_n) \mid k - 1 < \Phi(\mathbf{S}) \le k\right\}$$

будут областями равных оценок системы S (оценка объекта управления – по $\mathbf{S} = \mathbf{A} + \mathbf{BP}_{\text{м}}$; целостной эргатической системы (взаимодействие оператора и объекта управления) – по $\mathbf{S} = \mathbf{A} + \mathbf{BP}_{\text{м}}$ и $\mathbf{S} = \mathbf{A} + \mathbf{BP}$ и т.д.). *Оценку имитационных характеристик тренажных и обучающих комплексов* целесообразно производить на основе сравнения областей равных оценок двух систем «оператор – транспортное средство» и «оператор – имитатор».

Приведенные методики использовались при разработке авиационных тренажеров и могут использоваться при решении и других задач управления в сложных технических системах [7–9].

Список литературы

1. Andreev A.N., Danilov A.M., Klyuev B.V., Lapshin E.V., Blinov A.V., Yurkov N.K. Information models for designing conceptual broad-profile flight simulators / Measurement Techniques. August 2000. – Vol.43. Issue 8. – P. 667–672.

2. Гарькина И.А., Данилов А.М., Домке Э.Р. Промышленные приложения системных методологий, теорий идентификации и управления // Вестник МАДИ. – 2009. – № 2. – С. 77–81.

3. Будылина Е.А., Гарькина И.А., Данилов А.М. Моделирование с позиций управления в технических системах // Региональная архитектура и строительство. – 2012. – № 2. – С. 138–142.

4. Данилов А.М., Гарькина И.А. Математическое моделирование сложных систем: состояние, перспективы, пример реализации // Вестник гражданских инженеров. – 2012. – № 2. – С. 333–337.

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

6. Данилов А.М., Домке Э.Р., Гарькина И.А. Формализация оценки оператором характеристик объекта управления // Информационные системы и технологии. – 2012. – № 2. – 2012. – С. 5–10.

7. Будылина Е.А., Гарькина И.А., Данилов А.М. Декомпозиция динамических систем в приложениях / Региональная архитектура и строительство. – 2013. – № 3. – С. 95–100.

8. 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.

9. Родионов Ю.В., Ветохин А.С. Динамический автотренажер // Мир транспорта и технологических машин. – 2011. – № 4. – С. 90–93.

References

1. Andreev A.N., Danilov A.M., Klyuev B.V., Lapshin E.V., Blinov A.V., Yurkov N.K. Information models for designing conceptual broadprofile flight simulators // Measurement Techniques. August 2000. Vol.43. Issue 8. pp. 667–672.

2. Gar'kina I.A., Danilov A.M., Domke Je.R. Promyshlennye prilozhenija sistemnyh metodologij, teorij identifikacii i upravlenija // Vestnik MADI. 2009. no. 2. pp. 77–81.

3. Budylina E.A., Gar'kina I.A., Danilov A.M. Modelirovanie s pozicij upravlenija v tehnicheskih sistemah // Regional'naja arhitektura i stroitel'stvo. 2012. no. 2. pp. 138–142.

4. Danilov A.M., Gar'kina I.A. Matematicheskoe modelirovanie slozhnyh sistem: sostojanie, perspektivy, primer realizacii // Vestnik grazhdanskih inzhenerov. 2012. no. 2. pp. 333–337.

5. Gar'kina I.A., Danilov A.M., Domke Je.R. Matematicheskoe modelirovanie upravljajushhih vozdejstvij operatora v jergaticheskoj sisteme // Vestnik MADI. 2011. no. 2. pp. 18–23.

6. Danilov A.M., Domke Je.R., Gar'kina I.A. Formalizacija ocenki operatorom harakteristik ob#ekta upravlenija // Informacionnye sistemy i tehnologii. 2012. no. 2. pp. 5–10.

7. Budylina E.A., Gar'kina I.A., Danilov A.M. Dekompozicija dinamicheskih sistem v prilozhenijah // Regional'naja arhitektura i stroitel'stvo. 2013. no. 3. pp. 95–100.

8. Budylina E.A., Gar'kina I.A., Danilov A.M. Priblizhennye metody dekompozicii pri nastrojke imitatorov dinamicheskih sistem / Regional'naja arhitektura i stroitel'stvo. 2013. no. 3. pp. 150–156.

9. Rodionov Ju.V., Vetohin A.S. Dinamicheskij avtotrenazher // Mir transporta i tehnologicheskih mashin. 2011. no. 4. pp. 90–93.

Рецензенты:

Родионов Ю.В., д.т.н., профессор кафедры «Эксплуатация автомобильного транспорта», директор автомобильно-дорожного института Пензенского государственного университета архитектуры и строительства, г. Пенза;

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

Работа поступила в редакцию 18.04.2014.