

## ИНЖЕНЕРНО-ПСИХОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ФОРМИРОВАНИЯ СТИЛЯ И НАВЫКОВ УПРАВЛЕНИЯ РЕАЛЬНЫМ ОБЪЕКТОМ НА ТРЕНАЖЕРАХ

<sup>1</sup>Гарькина И.А., <sup>1</sup>Данилов А.М., <sup>1</sup>Нугаев А.С.

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

Определяются инженерно-психологические аспекты формирования на тренажерах стиля и навыков управления оператором, присущих управлению реальным объектом. Показывается, что характеристики имитационной модели должны выбираться, исходя из конкретных задач, которые должны решаться на обучающем комплексе; необходимы структурная и параметрическая идентификации объекта (первая основная техническая проблема синтеза обучающих комплексов, определяющая эффективность и качество подготовки операторов). Показывается, что соединение даже совершенных имитаторов в единую иерархическую структуру может привести к получению суммарных погрешностей моделирования, искажающих воспринимаемую оператором приборную, визуальную, акселерационную и др. информацию (вторая основная техническая проблема синтеза). В качестве примера рассматривается оценка качества имитационного моделирования объектов управления, описываемых системой обыкновенных дифференциальных уравнений в нормальной форме Коши. Дается формализованное описание навыков и стиля управления. Приводится методика определения оценки точности воспроизведения характеристик объекта в обучающем комплексе.

Ключевые слова: транспортные системы, подготовка операторов, качество подготовки операторов, имитационное моделирование объекта управления, критерии качества.

## ENGINEERING AND PSYCHOLOGICAL FOUNDATIONS OF FORMATION OF STYLE AND SKILLS OF CONTROL OF THE REAL OBJECT ON THE SIMULATOR

<sup>1</sup>Garkina I.A., <sup>1</sup>Danilov A.M., <sup>1</sup>Nugaev A.S.

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

Determined by engineering and psychological aspects of the formation the style and skills of control of the operator inherent to the of control of real object. It is shown that the characteristics of the simulation model should be selected based on the specific tasks that need to be addressed at the training complex; is determined the need of structural and parametric identification of the object (the first technical problem of synthesis of training complexes; determines the efficiency and the quality of control the operator). Indicated, that the connection of perfect simulators in a single hierarchical structure may result to the total modeling errors (second main technical problem of synthesis) that distort the perception of the operator (the instrument, visual and other types of information). As an example, is provided the evaluation of the quality of control objects described by a system of ordinary differential equations in normal form of Cauchy. Is given a formalized description of skills and control style. Is present the method of determining evaluation fidelity characteristics of the object in the training complex.

Keywords: transportation systems, training of operators, the quality of training of operators, their modeling objectional management, quality criteria.

Ведущее место в подготовке операторов эргатических транспортных систем в настоящее время занимают специализированные и комплексные тренажеры (прежде всего, для транспортных систем). В наибольшей степени они используются для формирования стиля и навыков управления оператором реальным объектом в условиях, когда объект заменяется на имитационную модель. Для многоцелевых систем практически отсутствует возможность точного описания объекта его моделью, особенно при противоречивых критериях. Нельзя добиться стопроцентной адекватности модели и реального объекта [1]. Поэтому всегда

можно говорить лишь о некоторой заданной степени адекватности, достаточной для решения некоторых основных видов деятельности оператора. Так, навыки управления органами управления летательным аппаратом могут быть сформированы с помощью имитационной модели, весьма далекой от требуемой адекватности. Например, при формировании вполне конкретного стиля управления реальным летательным аппаратом с конкретными динамическими характеристиками первичные навыки обращения с органами управления летательным аппаратом в известной степени такие же, как и при управлении другими техническими объектами. Отсюда следует первый важный вывод: *характеристики имитационной модели должны выбираться, исходя из конкретных задач, которые должны решаться на обучающем комплексе.*

Непосредственно из этого вытекает необходимость решения другой задачи [5,7]: *как описать навыки и стиль управления, что под этим понимать и как осуществить формализацию этих понятий?* Ясно, что решение этой задачи невозможно без формулировки и описания понятия «управляющее воздействие оператора». В настоящее время обучающие комплексы для транспортных систем представляют собой сложные технические устройства, использующие математическую модель объекта управления (полученную исходя из заданной степени точности). Обычно на временном интервале  $T = \{t, t_0 \leq t \leq t_1\}$  хорошим приближением является модель, описываемая обыкновенными дифференциальными уравнениями в нормальной форме Коши. В векторной форме модель представляется в виде:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t); \quad (1)$$

$\mathbf{x} \in X^n, \mathbf{u} \in U^m$  - соответственно векторы состояния и управления;  $t \in T$ ;  $\mathbf{A}, \mathbf{B}$  - матрицы, определяемые техническими параметрами объекта. В (1) предполагается непрерывность по совокупности переменных  $t, \mathbf{x}, \mathbf{u}$  и непрерывная дифференцируемость по  $t$  и  $\mathbf{x}$ . Поведение вектора  $\mathbf{u}$  может быть произвольным; уравнение (1) определяет управляемый процесс. Ход управляемого процесса определяется на некотором интервале  $t_0 \leq t \leq t_1$ , если на этом интервале вектор  $\mathbf{u}$  задан в виде

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}(t); \quad (2)$$

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}(\mathbf{x}, t). \quad (3)$$

Вектор-функция  $\mathbf{u}(t)$  является программным управлением, а  $\mathbf{u}(\mathbf{x}, t)$  - законом управления. Как видим, каждому выбору вектора управления  $\mathbf{u}$  и каждому начальному состоянию  $\mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0$  при  $t = t_0$  по (1) соответствует временная последовательность состояний  $\mathbf{x}(t, \mathbf{x}_0, t_0)$ , которой определяется программное движение системы  $S$ .

Система управлений в соответствии с (1) при заданных начальных условиях имеет вид

$$\mathbf{x}(t) = e^{A(t-t_0)}\mathbf{x}(t_0) + \mathbf{x}_N(t-t_0),$$

$$\mathbf{x}_N(t-t_0) = \int_{t_0}^t \Gamma(t-\tau)\mathbf{B}\mathbf{u}(\tau)d\tau, \quad \Gamma(t-\tau) = e^{A(t-\tau)}. \quad (4)$$

Таким образом, движение объекта описывается уравнением (1) в некоторой области изменения параметров, определяемой эксплуатационным диапазоном его применения. Решение (4) характеризует опорные траектории, соответствующие заданным начальным условиям при выбранном векторе управления  $\mathbf{u} = \mathbf{u}_c(t)$ . Оценка точности воспроизведения характеристик объекта в обучающем комплексе может производиться по соотношению:

$$\|\hat{\mathbf{x}}\| = \max_i \max_t |\mathbf{x}_{ic}(t) - \mathbf{x}_{iT}(t)|; \quad (5)$$

$$\hat{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{x}_c(t) - \mathbf{x}_T(t),$$

где  $\mathbf{x}_{ic}(t)$  - характеристики реального объекта, полученные при его натуральных испытаниях по регламентированным методам;  $\mathbf{x}_{iT}(t)$  - расчетные характеристики объекта при тех же начальных условиях, что и в (1).

ставляет в среднем бмой автоматического управления  $\mathbf{u}(t)$  представляется в виде

$$\mathbf{u}(t) = \mathbf{G}\mathbf{x}(t) + \mathbf{E}\mathbf{x}_{np}(t), \quad (6)$$

$\mathbf{G}, \mathbf{E}$  -соответственно матрицы управления по обратной связи и по вектору программных сигналов  $\mathbf{x}_{np}$ . Решения (1) и (6) для момента времени  $t$  имеют вид:

$$\mathbf{x}(t) = \Phi(t-t_0)\mathbf{x}(t_0) + \Gamma(t-t_0)\mathbf{E}\mathbf{x}_{np}(t_0), \quad (7)$$

$$\Phi(t-t_0) = e^{(A-\mathbf{B}\mathbf{G})(t-t_0)}, \quad \Gamma(t-t_0) = \int_{t_0}^t \Phi(t-\tau)\mathbf{B}d\tau, \quad \mathbf{x}_{np}(t) = const.$$

Выражением (7) описываются характеристики контура «объект – САУ».

Как правило, разработка имитационных моделей осуществляется при ограниченных сведениях и неполной информации о динамических свойствах имитируемого объекта. Поэтому нередко точность математической модели (1) по критерию (5) оказывается недостаточной. Необходимы *структурная и параметрическая идентификации* [2] объекта (основная техническая проблема синтеза обучающих комплексов, определяющая эффективность и качество подготовки операторов).

Обучающий комплекс в настоящее время строится по модульному принципу, каждый из которых является моделью отдельных подсистем. Однако надо помнить, что соединение даже совершенных имитаторов в единую иерархическую структуру может привести к

получению суммарных погрешностей моделирования, искажающих воспринимаемую оператором приборную, визуальную, акселерационную и др. информацию. Пришли ко второй основной технической проблеме синтеза обучающих комплексов. Указанные две проблемы являются определяющими при формировании навыка управления на обучающем комплексе. Задача сводится к сравнению двух эргатических систем: «оператор - модель объекта», «оператор - реальный объект». Модель каждой из указанных эргатических систем будет вместо уравнения (1) описываться уравнением вида:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = (\mathbf{A} - \mathbf{BPC})\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t) = -\mathbf{PC}\mathbf{x}(t), \quad (7)$$

$\mathbf{C}, \mathbf{P}$  - соответственно матрицы параметров информационной модели и оператора.

Если уравнения (1), (3) описывают движения объекта (модели) в контуре управления с САУ, то (9) характеризует эргатическую систему «оператор – объект» («оператор – информационная модель») в режиме ручного управления. Матрицей  $\mathbf{P}$  учитываются особенности восприятия и переработки оператором поступающей информации и формирования на этой основе управляющих движений. Однако невозможно предопределить реакцию оператора на информацию, получаемую в искусственных условиях, когда при обучении используется модель объекта. Это и является основным психофизиологическим аспектом проблемы синтеза обучающих комплексов, влияющим на формирование навыков управления.

К настоящему времени уже накоплен значительный экспериментальный материал, позволяющий определить структуру управляющих движений в эргатической системе; выявить процесс приспособления оператора к специфике управления имитационной моделью объекта. Экспериментальные данные подтвердили гипотезу, что имитационная модель фактически навязывает оператору алгоритмы рабочих операций, пространственно-временные характеристики которых не всегда соответствуют рабочим операциям оператора по управлению реальным объектом.

Тождественность структур деятельности оператора в двух эргатических системах («оператор – объект», «оператор – имитационная модель объекта») при выполнении одних и тех же задач определяется полнотой и точностью моделирования. Для ее оценки могут использоваться следующие основные критерии тождественности структур:

- пространственно-временных характеристик воздействий оператора на органы управления при тождественности движений реального объекта и имитационной модели;
- распределения и переключения внимания оператора на рассматриваемом отрезке движения реального объекта и модели;
- физиологических реакций оператора на движение объекта и имитационной модели на рассматриваемом отрезке времени.

Эти критерии являются обобщенными; охватывают внешние проявления деятельности оператора. Ими определяются достаточная полнота и точность моделирования. Объем необходимых экспериментов для определения структуры деятельности оператора на данном типе объекта зависит от условий получения статистической достоверности оценок структуры деятельности оператора, обусловленных случайными флуктуациями параметров объекта и чувствительностью человека к этим изменениям:

$$\Delta F \approx F_T - F_c = \sum_{j,i} \frac{\partial F}{\partial R_j} \frac{\partial R_j}{\partial x_i} \Delta x_i, j = \overline{1, n};$$

$F_T, F_c$  - соответственно обобщенные характеристики деятельности оператора по управлению имитационной моделью и реальным объектом;

$\frac{\partial F}{\partial R_j}$  определяет зависимость критерия  $R_j$  в оценке структуры деятельности;

$\frac{\partial R_j}{\partial x_i}$  характеризует чувствительность  $j$ -го критерия к изменению параметра  $x_i$

имитационной модели;

$\Delta x_i$  - максимально допустимая ошибка воспроизведения  $x_i$  в имитационной модели, при которой структуры деятельности оператора по управлению имитационной моделью и реальным объектом практически совпадают.

Деятельность оператора по управлению объектом фактически является поведенческим актом, объединяющим как процессы восприятия и переработки информации, так и формирования и выполнение на этой основе двигательных действий. Можно считать установленным, что в структуре сенсомоторного навыка управления двигательный компонент является интегральным показателем, отражающим полноту и качество переработки оператором информации, поступающей по каналам различных анализаторов. В конечном итоге почти вся информация, воспринимаемая оператором, реализуется в управляющих движениях. Именно, исходя из этого, в [3] оценка имитационной модели производилась по отклонению управлений  $u_c$  реальным объектом и имитационной моделью -  $u_T$ :

$$\hat{u}(t) = u_c(t) - u_T(t). \quad (8)$$

Как видим, фактическое соответствие систем «оператор – объект – среда» и «оператор – имитационная модель» можно оценивать с использованием соотношений (5) и (8).

Естественным образом определилась методика оптимизации в два этапа имитационных моделей с возможностью их корректировки. На первом этапе достигается

соответствие технических характеристик модели и реального объекта для разомкнутого контура; на втором обеспечивается сближение управляющих движений оператора.

В качестве управляющих воздействий оператора принимается

$$\dot{u}(t) = u(t) - m_u(t),$$

$m_u(t)$  - программное управление (опорная траектория), определяемая в виде

$$m_u(t) = \frac{1}{2T_0} \int_{-T_0}^{T_0} u(t) dt;$$

$T_0$  - длительность реализации.

Возможно аддитивное представление управляющих воздействий как суммы импульсов с различными амплитудами и длительностью

$$\dot{u}^k(t) = \sum_i \varphi_i(t - t_i^k)$$

или как поток импульсов и т.д. Чтобы определить динамические характеристики системы в процессе функционирования и сохранить оптимум управления (даже при значительном изменении параметров и структуры объекта) оператор опрашивает объект, периодически посылая импульсно-образные сигналы.

Исходя из используемого аналитического представления управляющих воздействий оператора, формируется обобщенный вектор управления

$$\mathbf{U} = \{\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}, \varphi, \dots\}$$

(зависит от технических параметров модели, характеризующих их степень влияния на структуру управленческой деятельности оператора).

Указанные выше аспекты являются методологической основой проектирования обучающих комплексов. Они в полной мере использовались для настройки параметров обучающих комплексов и уточнении структуры управляющих воздействий оператора. Использовались итеративные методы, которые дали возможность разработки ряда тренажеров специальных транспортных систем с повышенными обучающими показателями [4,6,8].

### Список литературы

1. Будылина Е.А., Гарькина И.А., Данилов А.М., Дулатов Р.Л. Структурная и параметрическая идентификация сложных эргатических систем / Фундаментальные исследования. –№2. -2015. – С.919-922.

2. Будылина Е.А., Гарькина И.А., Данилов А.М., Тюкалов Д.Е. Параметрическая идентификация эргатической системы с помехами /Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1; URL:<http://www.science-education.ru/121-17681>
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., Сухов Я.И. Оценка оператором характеристик объекта по управляемости / Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6. – С. 165.
5. Данилов А.М., Гарькина И.А., Дулатов Р.Л. Ретроспективная идентификация сложных систем // Региональная архитектура и строительство. – 2015. – № 1(22) –С.130 -136.
6. E. Budylna, A. Danilov. Approximation of aerodynamic coefficients in the flight dynamics simulator / Contemporary Engineering Sciences, Vol. 8, 2015, no. 10, 415-420. <http://dx.doi.org/10.12988/ces.2015.5256>.
7. E. Budylna, A. Danilov, I. Garkina. Control of multiobjective complex systems / Contemporary Engineering Sciences, Vol. 8, 2015, no. 10, 441-445. <http://dx.doi.org/10.12988/ces.2015.5276>.
8. A.Danilov, I.Garkina. Coherence function in analysis and synthesis of complex systems / Contemporary Engineering Sciences, Vol. 8, 2015, no. 9, 375-380. <http://dx.doi.org/10.12988/ces.2015.5236>.

**Рецензенты:**

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

Логанина В.И., д.т.н., профессор, зав.кафедрой «Управление качеством и технологии строительного производства» Пензенского государственного университета архитектуры и строительства, г. Пенза.