

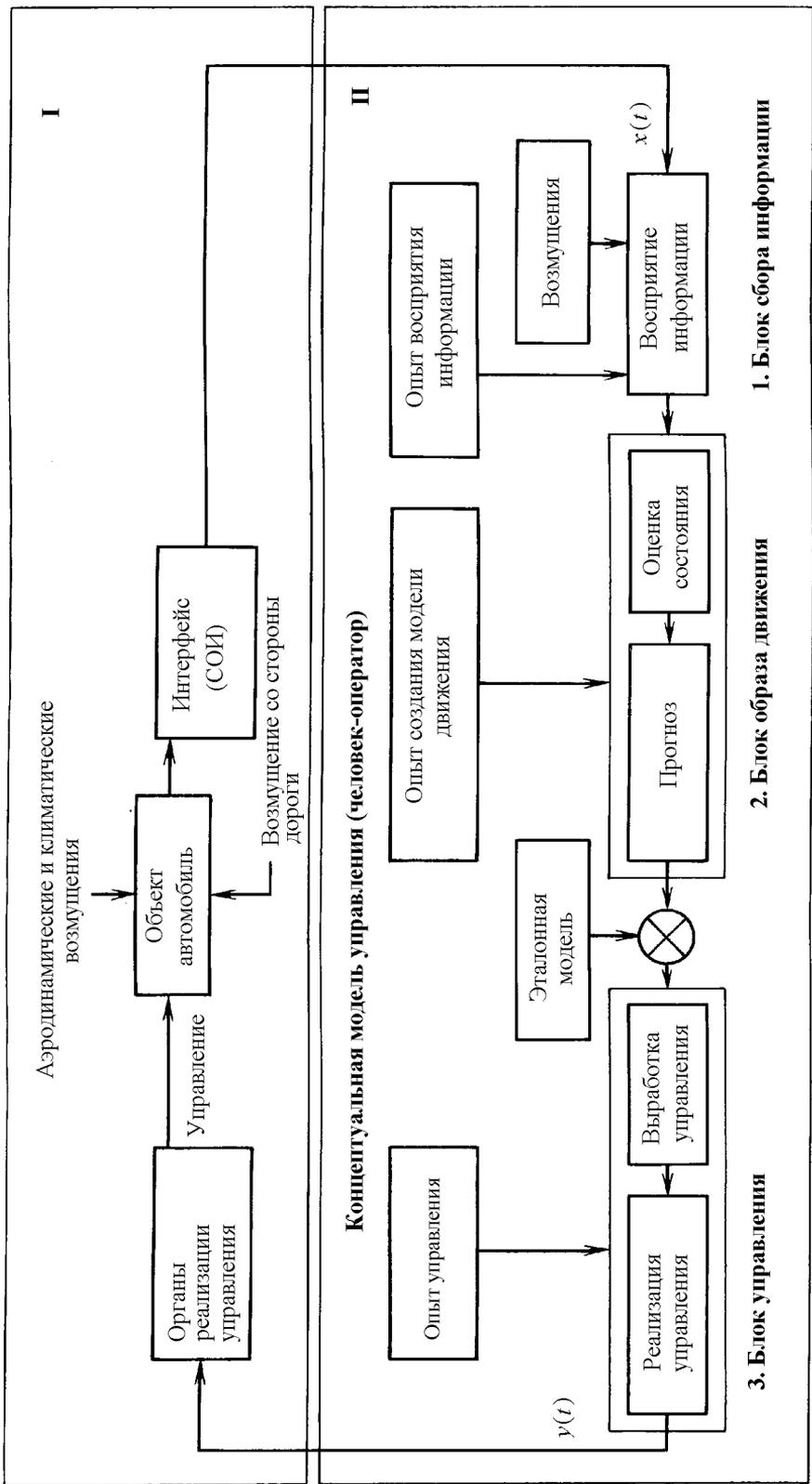
К. А. Пупков, А. Д. Устюжанин

ИДЕНТИФИКАЦИЯ И ОЦЕНКА ОБУЧЕННОСТИ В ДИНАМИЧЕСКИХ ЧЕЛОВЕКО-МАШИННЫХ СИСТЕМАХ

Рассмотрены проблемы идентификации и оценки степени обученности человека-оператора, работающего в системе человек-машина. Показано, каким образом можно оценить его динамические характеристики и вероятность успешной работы.

Сложность объектов управления непрерывно возрастает. Это связано с тем, что цели, которые ставятся перед этими объектами, должны достигаться при различных, порой экстремальных, воздействиях окружающей среды. События последних лет показывают, что для эффективного действия объектов, в управлении которых участвует человек, необходимо уделять особое внимание его обучению и адаптации к воздействию среды для достижения цели, поставленной перед системой человек-машина. Особенно важно построить при обучении систему тестов, обладающих полнотой, и найти объективные критерии оценки степени обученности оператора. Функция управления в современных системах частично выполняется компьютером, это освобождает человека-оператора для решения самых сложных проблем, не поддающихся автоматизации. Поэтому обучение и адаптация человека-оператора в человеко-машинных системах не упрощаются, а, наоборот, становятся более сложными.

Работа [1] посвящена анализу функционирования человека в системах человек-машина, изучению его динамических свойств, определению передаточной функции, т.е. решению задачи идентификации при задании некоторого входного воздействия и получении реакции с дальнейшей совместной обработкой сигналов на входе и на выходе системы. Поскольку, как известно, человек является нелинейной динамической системой, то такие методы не являются адекватными как по полноте теста, предъявляемого человеку, так и по способам построения его динамической модели. С современных позиций, учитывая достижения в области информационных технологий, нейрофизиологии и теории управления, концептуальную модель системы человек-машина на примере управления автомобилем можно представить в виде, приведенном на рис. 1. На рисунке представлены два крупных блока:



1. Блок сбора информации

2. Блок образа движения

3. Блок управления

Рис. 1. Концептуальная модель человек – автомобиль

I — модель объекта управления: автомобиль, в состав которого входят органы реализации управления, собственно динамика автомобиля и система отображения информации (СОИ), позволяющая человеку-оператору наблюдать как показания приборов, так и внешнюю обстановку движения автомобиля в окружающей среде (предполагается, естественно, что у системы человек–машина имеется цель, и поэтому деятельность человека в данной системе является целенаправленной); II — модель человека-оператора, включающая, в свою очередь, три блока: 1 — блок сбора информации, в котором должна быть отображена модель восприятия информации человеком; 2 — блок образа движения, модель которого должна отображать оценку состояния и прогноз движения на основе этой оценки; 3 — блок управления, в котором вырабатывается и исполняется управление на основе сопоставления сформированного и спрогнозированного образа движения с эталонным образом. Конечно, для реализации блоков 1–3 человек должен быть обучен, т.е. должен иметь навыки в сборе информации и ее понимании, в формировании образа движения и в управлении. Если известны математические модели блоков I и II, то при учете воздействий среды можно определить точность управления, необходимого для достижения цели. Однако если модель технической части системы человек–машина в определенной мере может быть описана адекватно, то описание модели человека-оператора до сих пор является проблематичным. Заметим, что представленная на рис. 1 схема концептуальной модели управления автомобилем может быть использована и для других движущихся объектов, например для летательного аппарата, в котором требуется целенаправленная деятельность человека-оператора — управление.

Далее рассмотрим, каким образом можно идентифицировать модель человека-оператора (рис. 1), используя математический аппарат теории функциональных рядов [2]. Модель будем строить в виде ряда

$$\hat{y}(t) = \sum_{n=0}^{\infty} G_n[h_n, x(t)], \quad (1)$$

где $\hat{y}(t)$ — оценка реакции $y(t)$ человека-оператора на сигнал $x(t)$, представляющий собой гауссовский белый шум со спектральной плотностью $S_x(\Omega) = c^2/2\pi$ и корреляционной функцией $R_x(\tau) = c^2\delta(\tau)$; сигнал $x(t)$ является тестом, обладающим полнотой; $G_n[h_n, x(t)]$ — ортогональные функционалы Винера такие, что $\overline{G_n \cdot G_m} = 0$ при $n \neq m$ (черта над произведением здесь и далее означает среднее по времени), имеющие следующий вид:

$$\begin{aligned}
G_0[h_0, x(t)] &= h_0 = \overline{y(t)}, \\
G_1[h_1, x(t)] &= \int_{-\infty}^{+\infty} h_1(\tau)x(t - \tau) d\tau, \\
G_2[h_2, x(t)] &= \\
&= \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} h_2(\tau_1, \tau_2)x(t - \tau_1)x(t - \tau_2) d\tau_1 d\tau_2 - c^2 \int_{-\infty}^{+\infty} h_2(\tau_2, \tau_2) d\tau_2
\end{aligned} \tag{2}$$

и т.д.

Из выражения (1) с учетом соотношений (2) видно, что для идентификации модели необходимо знать функции h_n , которые являются ядрами функционалов. Оказывается, что эти ядра можно определить путем совместной обработки экспериментальных данных входного $x(t)$ и выходного $y(t)$ сигналов по следующей формуле:

$$\begin{aligned}
h_n(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n) &= \\
&= 1/n!c^{2n} \overline{\left(y(t) - \sum_{m=0}^{n-1} G_m[h_m, x(t)] \right) x(t - \tau_1) \dots x(t - \tau_n)}, \tag{3}
\end{aligned}$$

где $x(t - \tau_1), \dots, x(t - \tau_n)$ — гауссовские белые шумы, взятые со сдвигами по времени τ_1, \dots, τ_n .

Определив ядра функционалов h_n , построим оценку реакции $y(t)$:

$$\hat{y}(t) = h_0 + \int_{-\infty}^{\infty} h_1(\tau)x(t - \tau) d\tau + \dots; \tag{4}$$

с помощью этой формулы можно делать выводы о близости оценки $\hat{y}(t)$ к действительной реакции человека на тестовый сигнал $x(t)$, а также о достаточности описания динамики человека-оператора, т.е. остановиться на вычислении некоторого числа n ядер h_n . Эти ядра функционалов являются исходными данными динамических свойств человека-оператора, при этом ядро первого порядка отражает линейные динамические свойства. На рис. 2 представлены графики ядер h_1 первого порядка для двух различных людей, полученные по экспериментальным данным. Аналитические зависимости, полученные аппроксимацией экспериментальных данных [3, 4], позволяют получить следующие результаты:

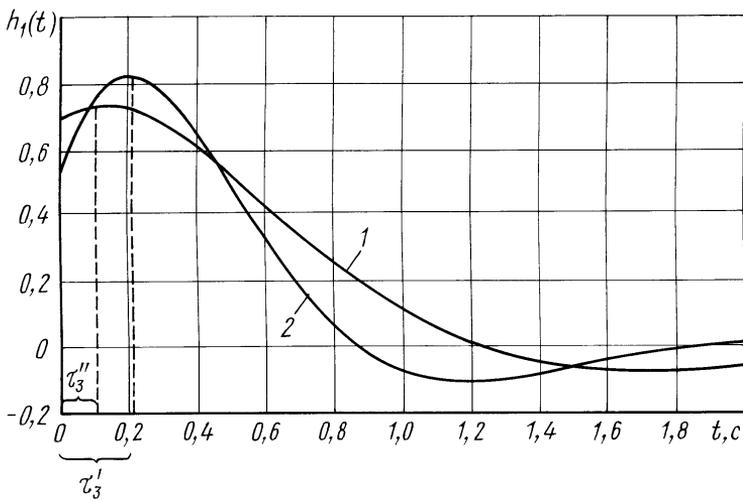


Рис. 2. Оценка функции h_1 по экспериментальным данным для двух различных человек-операторов:

1 — $h'_1(t)$, 2 — $h''_1(t)$

$$h'_1(t) = 0,74e^{-1,45|t-0,16|}(\cos 2,01|t - 0,16| + 0,647 \sin 2,01|t - 0,16|), \quad (5)$$

$$h''_1(t) = 0,74e^{-2,04|t-0,22|}(\cos 3,18|t - 0,22| + 0,64 \sin 3,18|t - 0,22|). \quad (6)$$

Соответственно, вычислим передаточные функции:

$$W'_1(s) = 0,74e^{-0,16s} \frac{s + 2,75}{s^2} + 2,9s + 6,14, \quad (7)$$

$$W''_1(s) = 0,74e^{-0,22s} \frac{s + 4,08}{s^2} + 4,08s + 14,16. \quad (8)$$

Экспериментальные данные были получены в результате слежения человеком-оператором с помощью перекрестия визира за реализацией случайного процесса, показанного на экране дисплея. Предъявленная человеку-оператору реализация и результат слежения фиксировались, и по формуле (3) вычислялись ядра h'_1 и h''_1 для двух различных людей.

Из формул (7) и (8) можно видеть, что в результате идентификации для разных людей получено различное время чистого запаздывания τ'_3 и τ''_3 , а также различные значения постоянных времени для дифференцирующего и колебательного звеньев. Декременты затухания также различны.

В настоящей работе эти данные являются строго обоснованными математически.

Исходя из общей динамики системы человек–машина можно при известной динамике технической части этой системы определить желательные динамические свойства человека-оператора, т.е. получить набор желательных ядер и затем построить процесс обучения и тренировки оператора так, чтобы ядра h_n , характеризующие динамику реального, конкретного человека, приближались к желательным. В результате получаем полную модель системы человек–машина, и, следовательно, можно провести ее математическое моделирование при учете различных воздействий без участия человека-оператора. Если же невозможно найти такого человека, динамические свойства которого после обучения и тренировки удовлетворяют желательным, то необходимо изменять техническую часть системы.

Теперь рассмотрим, каким образом можно оценить эффективность работы системы человек–машина при обучении и адаптации оператора в ее составе.

Фактически необходимо оценить вероятность успешной работы системы при испытаниях. Введем случайную величину [5]

$$\xi_i = \begin{cases} 0, & \text{если в } i\text{-м испытании произошло событие } E_0, \\ 1, & \text{если в } i\text{-м испытании произошло событие } E_1, \end{cases}$$

т.е. положим, что E_0 — неуспешное испытание, E_1 — успешное испытание.

Последовательность

$$\{\xi_i\} = \{\xi_1, \dots, \xi_i, \dots, \xi_n\}, \quad i = 1, \dots, n,$$

является одной из реализаций случайного процесса, в данном случае — процесса испытаний.

От простейшей статистики перейдем к случайной величине

$$k_i = \sum_{j=1}^i \xi_j, \quad (9)$$

которая представляет собой текущее число успешных испытаний в i испытаниях. Если в N испытаниях каждое последующее проводится без учета результатов предыдущего, т.е. без учета обученности и адаптации человека-оператора, то имеем независимые опыты, и тогда вероятность успешной работы имеет вид

$$P_N^*(E_1) = \frac{k_N}{N}, \quad P_N^*(E_1) \rightarrow P(E_1) \quad \text{при } N \rightarrow \infty. \quad (10)$$

Ожидаемое число успешных испытаний к i -му испытанию составляет

$$k_i^* = f(i) = P_N^*(E_1)i = \frac{k_N}{N} i. \quad (11)$$

Наилучшей аппроксимацией для выражения (11) в этом случае является прямая, производная от которой — вероятность успешной работы.

Теперь пусть испытания являются зависимыми, т.е. каждое последующее испытание проводится с учетом результатов предыдущего процесса обучения. Тогда траектория $f(i)$ будет в общем случае нелинейной функцией. Из физических соображений $f(i)$ должна удовлетворять следующим условиям:

$$i = 0, \quad k_i = 0, \quad 0 < \frac{\partial k_i}{\partial i} \leq 1, \\ 0 \leq \left(\frac{\partial k_i}{\partial i} \right)_{i=0} \leq \left(\frac{\partial k_i}{\partial i} \right)_{i=1} \leq \dots \leq \left(\frac{\partial k_i}{\partial i} \right)_{i=N} < 1, \quad \lim_{i \rightarrow \infty} k_i = bi - c, \quad (12)$$

где

$$b = P = \left(\frac{\partial k_i}{\partial i} \right)_{i=\infty}.$$

Можно указать класс непрерывных функций, обладающих указанными свойствами:

$$k_i = bi - cA(i), \quad (13)$$

где b , c , A — коэффициенты, характеризующие конкретную траекторию. При этом должны быть выполнены следующие предельные соотношения:

$$\lim_{i \rightarrow \infty} A(i) \leq 1, \quad \lim_{i \rightarrow 0} A(i) = 0. \quad (14)$$

Со всех точек зрения подходящей для $A(i)$ является зависимость вида

$$A(i) = 1 - e^{-i/a}. \quad (15)$$

Аппроксимирующая функция для траектории тогда имеет вид

$$k_i^* = bi - c(1 - e^{-i/a}). \quad (16)$$

Текущая оценка вероятности успешной работы системы в соответствии с выражением (11) составит

$$P_i^*(E_1) = \frac{\partial k_i^*}{\partial i} = b - \frac{c}{a} e^{-i/a}, \quad (17)$$

а к концу обучения получим

$$P_N^*(E_1) = \left(\frac{\partial k_i^*}{\partial i} \right)_{i=N} = b - \frac{c}{a} e^{-N/a}. \quad (18)$$

Для того чтобы вычислить оценку (18), необходимо определить коэффициенты a , b и c . Для этого минимизируем следующий квадратичный функционал:

$$Q = \sum_{i=1}^N (k_i - bi + c(1 - e^{-i/a}))^2 = \min. \quad (19)$$

Приравняв нулю частные производные

$$\frac{\partial Q}{\partial a} = \frac{\partial Q}{\partial b} = \frac{\partial Q}{\partial c} = 0,$$

получим систему алгебраических уравнений, из которых определяются искомые коэффициенты [5]. Функция $f(i)$ описывает процесс совершенствования системы человек–машина за счет целенаправленной деятельности человека-оператора.

Таким образом, рассмотрены конкретные решения проблемы идентификации, обучения и адаптации человека-оператора в человеко-машинных системах. Приведенные результаты могут быть использованы при построении интеллектуальных систем [6] подготовки человека-оператора для управления движущимися объектами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sheridan T. B., Ferrell W. R. Man-Machine Systems. – Cambridge/London: The MIT Press, 1974.
2. Пупков К. А., Капалин В. И., Ющенко А. С. Функциональные ряды в теории нелинейных систем. – М.: Наука, 1976. – 446 с.
3. P o u r k o f f К. The optimization of connection between Human begin and techniques in Man-Machine systems // Preprints of the IFAC-IFORS Symposium (Varna, Bulgaria, 8–11 Oct. 1974). – P. 419–426.
4. Пупков К. А. и др. Экспериментальное определение характеристик работы оператора в контуре слежения // Изв. вузов. Сер. Приборостроение. – 1994. – Т. 37. – № 9–10. – С. 45–50.
5. Пупков К. А., Костюк Г. А. Оценка и планирование эксперимента. – М.: Машиностроение, 1977. – 118 с.
6. Пупков К. А., Коньков В. Г. Интеллектуальные системы. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. – 348 с.

Статья поступила в редакцию 7.02.2003