

УДК 629.7 : 62—506.2.001

ОБ ОДНОЙ СТОХАСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЧЕЛОВЕКА-ОПЕРАТОРА В КОНТУРЕ РУЧНОГО УПРАВЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИМ ОБЪЕКТОМ

И. В. Курочкин, А. А. Мальцев

Исследуется стохастическая модель человека-оператора в контуре ручного управления динамическим объектом, находящимся под воздействием случайных возмущений внешней среды и внутренних шумов оператора. Проводится экспериментальная проверка модели для задачи однопараметрической стабилизации динамического объекта первого порядка.

Задача моделирования деятельности человека-оператора, осуществляющего ручное управление динамическим объектом, несмотря на значительное число исследований (см., например, [1, 2]) пока не имеет удовлетворительного решения. Основная трудность связана с тем, что характеристики человека-оператора зависят от множества факторов, таких, как динамика объекта управления, уровень зашумленности системы, степень обученности оператора, уровень его мотивации и т. п. Одним из современных подходов к решению этой задачи является представление человека-оператора в виде квазипримимальной системы, функционирующей согласно некоторому критерию оптимальности, который отражает основные требования к деятельности человека-оператора [2—7]. Например, ряд авторов [5—7] считает, что в процессе работы человек-оператор «находит» определенный компромисс между точностью и затратами на управление. В частности, в [5, 6] человек-оператор представляется в виде статистически оптимальной системы типа фильтра Калмана, минимизирующей квадратичный функционал от вектора управления и вектора состояния динамического объекта. Однако в указанных работах предполагалось, что оптимизация управления происходит только за счет коэффициента усиления нервномышечной системы, тогда как реальный оператор может в определенной степени адаптировать и постоянную времени своих нейромоторных реакций [8]. Кроме того, квадратичный функционал качества работы оператора, используемый в [5, 6], лишь косвенно отражает собственные энерготраты человека-оператора и не описывает учет человеком-оператором энерготрат управляемой им системы в целом (например расход топлива двигателем).

В настоящей работе предлагается стохастическая модель контура ручного управления динамическим объектом, которая учитывает, что человек-оператор (работающий по типу фильтра Калмана) может в определенных пределах подстраивать (адаптировать) под параметры объекта и внешней среды не только коэффициент усиления, но и постоянную времени нервномышечной системы. Предполагается также, что «выбор» оператором оптимальных параметров нервномышечной системы осуществляется в соответствии с собственным функционалом критерия качества, отражающим требования оператора к точности стабилизации координаты объекта, интенсивности «своего» управляющего воз-

действия и общим энерготратам системы на управление. В качестве примера подробно исследуется задача статистически оптимальной стабилизации динамического объекта первого порядка.

1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОНТУРА РУЧНОГО УПРАВЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИМ ОБЪЕКТОМ

Предположим, что человек-оператор в соответствии с целью управления и собственным функционалом критерия качества $I_{\text{оп}}$ по результатам наблюдения вектора $\mathbf{z}(t)$ с индикаторного устройства, имеющего матричный коэффициент усиления \mathbf{H} , формирует оптимальную оценку $\hat{\mathbf{x}}^*(t)$ вектора состояния $\mathbf{x}(t)$, а затем с помощью своей нервномышечной системы — оптимальное воздействие $\mathbf{u}_{\text{оп}}^*(t)$ на органы управления объектом, которое усиливается исполнительным устройством с матричным коэффициентом усиления \mathbf{S}^* . Будем считать, что человеко-машинная система находится под воздействием гауссовых «белых» шумов: внешней среды $\xi(t)$, внутренних шумов нервномышечной системы человека-оператора $\eta_{\text{оп}}(t)$ и шумов индикации $\zeta(t)$. Предположим также, что целью управления является стабилизация требуемого значения вектора состояния динамического объекта, которое без потери общности принимается нулевым вектором.

Функционирование человеко-машинной системы описывалось следующими уравнениями ее компонент.

Объект управления

$$\dot{\mathbf{x}} = -\mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{C}\mathbf{u} + \mathbf{G}\xi, \quad (1)$$

где \mathbf{A} , \mathbf{C} , \mathbf{G} — постоянные матрицы, \mathbf{u} — вектор управления.

Индикаторное устройство

$$\mathbf{z} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \zeta, \quad (2)$$

где

$$\zeta = \zeta_{\text{оп}} + \mathbf{H}\zeta_{\text{ш}}.$$

Здесь $\zeta_{\text{оп}}$ — эквивалентный белый шум наблюдения человеком-оператором информации индикаторного устройства, $\zeta_{\text{ш}}$ — эквивалентный белый шум индикатора, обусловленный шумами аппаратуры и внешней среды.

Исполнительное устройство

$$\mathbf{u} = \mathbf{S}\mathbf{u}_{\text{оп}}. \quad (3)$$

Человек-оператор. Предполагалось, что оценка человеком-оператором вектора состояния динамического объекта описывается уравнением фильтра Калмана с матричным коэффициентом усиления $\mathbf{K}_{\text{оп}}$:

$$\dot{\hat{\mathbf{x}}} = -\mathbf{A}\hat{\mathbf{x}} + \mathbf{K}_{\text{оп}}(\mathbf{z} - \mathbf{H}\hat{\mathbf{x}}) + \mathbf{C}\mathbf{u}, \quad (4)$$

а нейромускульная система — уравнением инерционного звена [5]:

$$\mathbf{T}_{\text{оп}} \dot{\mathbf{u}}_{\text{оп}} + \mathbf{u}_{\text{оп}} = \tilde{\mathbf{u}}_{\text{оп}} + \eta_{\text{оп}}, \quad (5)$$

где $\mathbf{T}_{\text{оп}}$ — диагональная матрица постоянных времени, характеризующих инерционность нейромускульной системы человека, $\tilde{\mathbf{u}}_{\text{оп}} = -\mathbf{Q}_{\text{оп}}\hat{\mathbf{x}}$ — вектор управления, действующий на входе нейромускульной системы, имеющей матричный коэффициент усиления $\mathbf{Q}_{\text{оп}}$.

* Здесь и в дальнейшем параметры, относящиеся к человеку-оператору, будут отмечаться индексом «оп», стоящим внизу обозначения параметра, оптимальные параметры — знаком *, стоящим вверху обозначений, заглавными буквами жирным шрифтом обозначены матрицы.

В пользу моделирования человека-оператора структурой типа фильтра Калмана можно привести следующее обоснование: человек в процессе управления корректирует свои действия по сигналу рассогласования между ожидаемым и фактическим результатом своего функционирования и стремится действовать при этом некоторым оптимальным образом (см., например, [2, 9, 10]).

Таким образом, на основании сделанных предположений (1)–(5) контур ручного управления может быть компактно описан следующим линейным векторным стохастическим уравнением:

$$\dot{\mathbf{y}} = \mathbf{F}\mathbf{y} + \mathbf{E}\boldsymbol{\Phi}, \quad (6)$$

$$\text{где } \mathbf{y}^t = \| \mathbf{x}^t, \mathbf{u}_{\text{оп}}^t, \tilde{\mathbf{x}}^t \|, \quad \boldsymbol{\Phi}^t = \| \xi^t, \eta_{\text{оп}}^t, \zeta^t \|, \quad \tilde{\mathbf{x}}_{\text{оп}} = \hat{\mathbf{x}} - \mathbf{x}$$

— вектор ошибки фильтрации,

$$\mathbf{F} = \begin{vmatrix} -\mathbf{A} & \mathbf{C}\mathbf{S} & \mathbf{0} \\ -\mathbf{B}_{\text{оп}}\mathbf{Q}_{\text{оп}} & -\mathbf{B}_{\text{оп}} & -\mathbf{B}_{\text{оп}}\mathbf{Q}_{\text{оп}} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & -\mathbf{M}_{\text{оп}} \end{vmatrix}, \quad \mathbf{E} = \begin{vmatrix} \mathbf{G} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{B}_{\text{оп}} & \mathbf{0} \\ -\mathbf{G} & \mathbf{0} & \mathbf{K}_{\text{оп}} \end{vmatrix},$$

$\mathbf{B}_{\text{оп}} = \mathbf{T}_{\text{оп}}^{-1}$, $\mathbf{M}_{\text{оп}} = \mathbf{A} + \mathbf{K}_{\text{оп}} \mathbf{H}$ — матрица, характеризующая инерционность оценки вектора состояния $\hat{\mathbf{x}}$ человеком-оператором; $\hat{\mathbf{x}}$ и $\mathbf{0}$ имеют смысл единичной и нулевой матриц соответствующих размеров.

Начальные условия уравнения (6) могут быть заданы, например, в виде случайного гауссова вектора с математическим ожиданием $\langle \mathbf{y}^t(0) \rangle = \| \langle \mathbf{x}^t(0) \rangle, \langle \mathbf{u}_{\text{оп}}^t(0) \rangle, -\langle \mathbf{x}^t(0) \rangle \|$ и ковариационной матрицей $\langle \mathbf{y}(0) \mathbf{y}^t(0) \rangle$ (здесь т — знак транспонирования.)

Примем, что человек-оператор работает в контуре ручного управления в соответствии со следующим квадратичным функционалом критерия качества:

$$I_{\text{оп}} = \left\langle \mathbf{x}^t(T) \Gamma_{\text{оп}1} \mathbf{x}(T) + 1/T \times \right. \\ \left. \times \int_0^T (\mathbf{x}^t \Gamma_{\text{оп}2} \mathbf{x} + \mathbf{u}^t \Gamma_{\text{оп}3} \mathbf{u} + \mathbf{u}_{\text{оп}}^t \Gamma_{\text{оп}4} \mathbf{u}_{\text{оп}}) dt \right\rangle. \quad (7)$$

Здесь первое слагаемое отражает «штраф» оператора за конечную погрешность стабилизации, второе — текущую погрешность, третье — «энерготраты» управляющего устройства машины, четвертое — собственные «энерготраты» человека. С учетом (3) функционал (7) можно записать так:

$$I_{\text{оп}} = \left\langle \mathbf{x}^t(T) \Gamma_{\text{оп}1} \mathbf{x}(T) + 1/T \int_0^T [\mathbf{x}^t \Gamma_{\text{оп}2} \mathbf{x} + \mathbf{u}_{\text{оп}}^t \times \right. \\ \left. \times (\mathbf{S}^t \Gamma_{\text{оп}3} \mathbf{S} + \Gamma_{\text{оп}4}) \mathbf{u}_{\text{оп}}] dt \right\rangle. \quad (8)$$

Отметим, что элементы матриц $\Gamma_{\text{оп}i}$ ($i = 1, \dots, 4$) функционалов (7), (8) имеют смысл собственных требований человека-оператора на точность и интенсивность управления по различным координатам векторов и отражают психофизиологическое состояние оператора во время выполнения задания.

Далее предположим, что в процессе управления человек-оператор интуитивно подстраивает свой параметры к оптимальным, исходя из

условия минимума среднеквадратичной ошибки фильтрации и собственного функционала критерия качества (7):

$$\frac{\partial \langle \tilde{x}^T \tilde{x} \rangle}{\partial k_{\text{оп}}}_{ij} = 0, \quad \frac{\partial I_{\text{оп}}}{\partial \omega_{\text{оп}}}_{kl} = 0, \quad \frac{\partial I_{\text{оп}}}{\partial \beta_{\text{оп}}}_{mn} = 0. \quad (9)$$

Решая систему уравнений (9), можно найти оптимальные по $I_{\text{оп}}$ параметры человека-оператора: коэффициент усиления оптимальной фильтрации (4) $K_{\text{оп}}^*$, коэффициент усиления $\Omega_{\text{оп}}^*$ и постоянную времени $T_{\text{оп}}^*$ нервномышечной системы оператора.

2. СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЧЕЛОВЕКО-МАШИННОЙ СИСТЕМЫ

Как видно из уравнений (7)–(9), для нахождения оптимальных параметров человека-оператора необходимо знать моменты второго порядка векторов состояния и управления как функции оптимизируемых параметров. Поскольку по предположению шумы ξ , $\eta_{\text{оп}}$, ζ являются гауссовыми «белыми», то случайный процесс (6) полностью описывается математическим ожиданием и ковариационной матрицей, которые согласно [11] находятся из следующих уравнений:

$$\langle d/dt \rangle \langle y(t) \rangle = F \langle y(t) \rangle + E \langle \psi(t) \rangle; \quad (10)$$

$$\langle d/dt \rangle \langle y(t) y^T(t) \rangle = F \langle y(t) y^T(t) \rangle + \langle y(t) y^T(t) \rangle F^T + E D E^T \quad (11)$$

при заданных начальных условиях $\langle y(0) \rangle$, $\langle y(0) y^T(0) \rangle$. Здесь D – положительно определенная матрица интенсивности векторного белого шума $\psi(t)$. В частности, если

$$\begin{aligned} \langle \xi(t_1) \xi^T(t_2) \rangle &= Q \delta(t_2 - t_1), \quad \langle \eta_{\text{оп}}(t_1) \eta_{\text{оп}}^T(t_2) \rangle = \\ &= J_{\text{оп}} \delta(t_2 - t_1), \quad \langle \zeta(t_1) \zeta^T(t_2) \rangle = R \delta(t_2 - t_1) \end{aligned}$$

и шумы $\xi(t)$, $\eta_{\text{оп}}(t)$, $\zeta(t)$ некоррелированы, то

$$D = \begin{vmatrix} Q & 0 & 0 \\ 0 & J_{\text{оп}} & 0 \\ 0 & 0 & R \end{vmatrix}.$$

Корреляционная функция вектора y будет иметь вид

$$\langle y(t_1) y^T(t_2) \rangle = \Phi(t_1, t_2) \langle y(t_1) y^T(t_1) \rangle, \quad (12)$$

где $\Phi(t_1, t_2)$ – переходная матрица системы, определяемая из решения уравнения $\dot{\Phi}(t_1, t_2) = F\Phi(t_1, t_2)$ при начальном условии $\Phi(t_1, t_1) = 1$.

В общем случае многопараметрической задачи нахождение статистических характеристик и особенно решение нелинейных уравнений (9) чрезвычайно сложно и может быть осуществлено только с помощью численных методов. Мы для иллюстрации основных особенностей и экспериментальной проверки предложенной модели рассмотрим задачу стабилизации человеком-оператором динамического объекта первого порядка.

3. СТАТИСТИЧЕСКИ ОПТИМАЛЬНАЯ СТАБИЛИЗАЦИЯ ЧЕЛОВЕКОМ-ОПЕРАТОРОМ ДИНАМИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА ПЕРВОГО ПОРЯДКА

Для данного случая матричное уравнение динамики человеко-машинной системы (6) примет вид

$$\begin{vmatrix} \dot{x} \\ \dot{u}_{\text{оп}} \\ \dot{x}_{\text{оп}} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -\alpha & s & 0 \\ -\beta_{\text{оп}} \omega_{\text{оп}} & -\beta_{\text{оп}} & -\beta_{\text{оп}} \omega_{\text{оп}} \\ 0 & 0 & -\mu_{\text{оп}} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} x \\ u_{\text{оп}} \\ \tilde{x}_{\text{оп}} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \beta_{\text{оп}} & 0 \\ -1 & 0 & k_{\text{оп}} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \xi \\ \eta_{\text{оп}} \\ \zeta \end{vmatrix}, \quad (13)$$

где α , s , $\omega_{\text{оп}}$, $\beta_{\text{оп}}$, $k_{\text{оп}}$, $\mu_{\text{оп}}$ представляют скалярные величины. Предположим следующие статистические характеристики шумов системы:

$$\begin{aligned} \langle \xi(t) \rangle &= \langle \eta_{\text{оп}}(t) \rangle = \langle \zeta_{\text{и}}(t) \rangle = \langle \zeta_{\text{оп}}(t) \rangle = 0, \\ \langle \xi(t_1) \xi(t_2) \rangle &= q \delta(t_2 - t_1), \quad \langle \eta_{\text{оп}}(t_1) \eta_{\text{оп}}(t_2) \rangle = j_{\text{оп}} \delta(t_2 - t_1), \\ \langle \zeta(t_1) \zeta(t_2) \rangle &= r \delta(t_2 - t_1), \end{aligned}$$

где $r = r_{\text{оп}} + r_{\text{и}} h^2$. Здесь q — интенсивность шума внешней среды, $j_{\text{оп}}$ — интенсивность шума нервномышечной системы оператора, $r_{\text{оп}}$ — интенсивность шума наблюдения информации оператором, $r_{\text{и}}$ — интенсивность собственного шума индикаторного устройства.

Исследуем стационарный режим работы человека-машинной системы. Функционал критерия качества человека-оператора (7) для рассматриваемого случая запишется как

$$J_{\text{оп}} = \gamma_{\text{оп}1}^2 \langle x^2 \rangle + \gamma_{\text{оп}2}^2 \langle u_{\text{оп}}^2 \rangle + \langle u^2 \rangle, \quad (14)$$

где $\gamma_{\text{оп}1}$, $\gamma_{\text{оп}2}$ имеют смысл собственных требований человека-оператора к точности управления и интенсивности манипуляций с органом управления, соотнесенных к требованию оператора на энерготраты управляемой системы.

Как следует из (11), (13), стационарная ошибка оценки оператором координаты управляемого объекта

$$\langle \tilde{x}_{\text{оп}}^2 \rangle = (q + k_{\text{оп}}^2 r)/2(\alpha + k_{\text{оп}} h). \quad (15)$$

Из (15) видно, что ошибка оценки зависит только от коэффициента усиления фильтра Калмана, действующих шумов и чувствительности индикаторного устройства. При $k_{\text{оп}}^* = -\alpha/h + \sqrt{\alpha^2/h^2 + q/(r_{\text{оп}} + r_{\text{и}} h^2)}$ она достигает минимума, равного

$$\langle (\tilde{x}^*)^2 \rangle = q(\alpha + \mu_{\text{оп}}^*), \quad (16)$$

где

$$1/\mu_{\text{оп}}^* = 1/(\alpha + k_{\text{оп}}^* h) = 1/\sqrt{\alpha^2 + qh^2/(r_{\text{оп}} + r_{\text{и}} h^2)} \quad (17)$$

— оптимальная постоянная времени оператора, работающего по типу фильтра Калмана (4).

Всюду в дальнейшем будем предполагать, что человек-оператор по наблюдению с индикатора делает оптимальную оценку координаты управляемого объекта, т. е. $\mu_{\text{оп}} = \mu_{\text{оп}}^*$. В этом случае дисперсия координаты объекта и управляющей (не усиленного) воздействия оператора выразится через параметры системы следующим образом:

$$\langle x^2 \rangle = \frac{q}{2} \frac{(\alpha + \beta_{\text{оп}}) + \omega_{\text{оп}} s [1 + 2\beta_{\text{оп}}/(\alpha + \mu_{\text{оп}}^*)] + \beta_{\text{оп}} s^2 j_{\text{оп}}/q}{(\alpha + \beta_{\text{оп}})(\alpha + \omega_{\text{оп}} s)}; \quad (18)$$

$$\langle u_{\text{оп}}^2 \rangle = \frac{j_{\text{оп}} \beta_{\text{оп}}}{2} \frac{\alpha(\alpha + \beta_{\text{оп}}) + \omega_{\text{оп}} s \beta_{\text{оп}} + \omega_{\text{оп}}^2 \rho^{-1}}{(\alpha + \beta_{\text{оп}})(\alpha + \omega_{\text{оп}} s)}, \quad (19)$$

где

$$\rho = (j_{\text{оп}}/q)(\omega_{\text{оп}}^* + \alpha)/(\omega_{\text{оп}}^* - \alpha) \quad (20)$$

— безразмерный коэффициент зашумленности системы.

Корреляционные функции ошибки стабилизации и выходного сигнала нервномышечной системы оператора легко могут быть найдены из уравнений (11), (12):

$$\begin{aligned} \langle x(t)x(t+\tau) \rangle &= [\langle x^2 \rangle / (\lambda_1 - \lambda_2)] [-(\alpha + \lambda_3)e^{\lambda_1\tau} + \\ &+ (\alpha + \lambda_1)e^{\lambda_2\tau} + (\langle xu_{\text{оп}} \rangle / \langle x^2 \rangle)(e^{\lambda_1\tau} - e^{\lambda_2\tau})]; \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \langle u_{\text{оп}}(t)u_{\text{оп}}(t+\tau) \rangle &= [\langle u_{\text{оп}}^2 \rangle / (\lambda_1 - \lambda_2)] [-(\beta_{\text{оп}} + \lambda_2)e^{\lambda_1\tau} + \\ &+ (\beta_{\text{оп}} + \lambda_1)e^{\lambda_2\tau} + (\langle xu_{\text{оп}} \rangle / \langle u_{\text{оп}}^2 \rangle)(e^{\lambda_1\tau} - e^{\lambda_2\tau})], \end{aligned} \quad (22)$$

где

$$\lambda_{1,2} = -(\alpha + \beta_{\text{оп}})/2 \pm \sqrt{(\alpha + \beta_{\text{оп}})^2/4 - \beta_{\text{оп}}(\alpha + s\omega_{\text{оп}})}, \quad (23)$$

$$\langle xu_{\text{оп}} \rangle = \frac{\alpha \langle x^2 \rangle}{s} - \frac{q}{2s} = \frac{j_{\text{оп}}\beta_{\text{оп}} - 2\langle u_{\text{оп}}^2 \rangle}{2\omega_{\text{оп}}}.$$

Как следует из (21)–(23), при $\alpha + s\omega_{\text{оп}} > (\alpha + \beta_{\text{оп}})^2/4\beta_{\text{оп}}$ в системе наблюдается осцилляторный режим работы, а при $\beta_{\text{оп}} < -\alpha$ или $\beta(\alpha + s\omega_{\text{оп}}) < 0$ система становится неустойчивой из-за инерционности человека-оператора. Всюду ниже мы будем считать, что требование устойчивости выполняется.

Подставляя (18), (19) в (14), из системы уравнений (9) найдем остальные параметры оптимального оператора — коэффициент усиления $\omega_{\text{оп}}^*$ и постоянную времени $\tau_{\text{оп}}^* = 1/\beta_{\text{оп}}^*$ его нервномышечной системы:

$$\omega_{\text{оп}}^* = -\alpha/s + \alpha/s \sqrt{(1 + \rho s^2)[1 + \gamma_{\text{оп}1}^2 s^2/\alpha^2(s^2 + \gamma_{\text{оп}2}^2)]}; \quad (24)$$

$$\tau_{\text{оп}}^* = \{-\alpha + [(\omega_{\text{оп}}^*/\rho - \alpha s)[s\gamma_{\text{оп}1}^2/(s^2 + \gamma_{\text{оп}2}^2) - \alpha\omega_{\text{оп}}]/(\alpha + \omega_{\text{оп}}^* s)]^{1/2}\}^{-1}. \quad (25)$$

Формулы (17), (20), (24), (25) определяют характеристики оптимального «стационарного» человека-оператора через характеристики действующих шумов и параметров машинной части системы.

Аналогичным образом можно поставить задачу нахождения оптимальных параметров машинной части системы в зависимости от характеристик человека-оператора (не обязательно оптимальных). Например, как нетрудно видеть из (18), погрешность стабилизации координаты объекта минимальна при коэффициенте усиления исполнительного устройства, равном

$$s^* = -\alpha/\omega_{\text{оп}} + \sqrt{\alpha^2/\omega_{\text{оп}}^2 + 1/\rho}. \quad (26)$$

Поскольку мы предполагаем, что в процессе выполнения задания человек-оператор интуитивно подстраивает свои параметры к оптимальным значениям и после некоторого периода «обучения» работает оптимально в соответствии со своим функционалом (14), то из уравнений (24), (26) можно найти выражение для оптимального (в смысле минимума погрешности стабилизации) значения коэффициента усиления исполнительного устройства через параметры функционала человека-оператора, характеристики шумов системы и параметры объекта:

$$(s^*)^2 = \begin{cases} [3/\rho + 2\gamma_{\text{оп}}^2/\rho\alpha^2 - \gamma_{\text{оп}}^2] - [(3/\rho + \gamma_{\text{оп}}^2)^2 + (1/\rho + \gamma_{\text{оп}}^2) \times \\ \times 8\gamma_{\text{оп}}^2/\rho\alpha^2]^{1/2}] [2(1 + \gamma_{\text{оп}}^2/\alpha^2)]^{-1}, & \text{если } \gamma_{\text{оп}}^2 > 3\alpha^2\rho\gamma_{\text{оп}}^2, \\ 0, & \text{если } \gamma_{\text{оп}}^2 \leq 3\alpha^2\rho\gamma_{\text{оп}}^2. \end{cases} \quad (27)$$

4. ОБСУЖДЕНИЕ МОДЕЛИ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В предыдущем разделе были получены оптимальные характеристики системы ручного управления динамическим объектом в предположении, что человек-оператор может интуитивно подстраивать (адаптировать) свои параметры (коэффициент усиления $\omega_{\text{оп}}$ и постоянную времени $\tau_{\text{оп}}$ нервномышечной системы) под параметры объекта и внешней среды в соответствии с собственным функционалом критерия качества. Как видно из (24), (25), оптимальные параметры нервномышечной системы оператора определяются весовыми коэффициентами функционала, параметрами «машинной» части системы, а также интенсивностями внешних и внутренних шумов человека-машинной системы. Зависимость оптимальных параметров человека-оператора (24), (25) от уровня зашумленности системы принципиально отличает предложенную модель оператора от известных в литературе [5, 6].

Следует подчеркнуть, что зависимость параметров оператора от характеристик шумов имеет место только через коэффициент зашумленности ρ (20), в величину которого входят интенсивности всех шумов, действующих на систему. Так, если шумы индикации и наблюдения отсутствуют ($r_i = r_{\text{оп}} = 0$), то коэффициент зашумленности принимает значение $j_{\text{оп}}/q$, которое стремится к нулю при малом шуме нервномышечной системы ($j_{\text{оп}} \ll q$). При сильных шумах, действующих в системе, или при малой чувствительности индикаторного устройства ($h \rightarrow 0$) коэффициент зашумленности неограниченно возрастает ($\rho \rightarrow \infty$).

Для иллюстрации особенностей предложенной модели человека-оператора рассмотрим ее поведение при предельных уровнях зашумленности (ρ) и требованиях оператора по точности стабилизации координаты динамического объекта ($\gamma_{\text{оп}}^1$). При сильной зашумленности системы ($\rho \rightarrow \infty$) или малых требованиях к точности ($\gamma_{\text{оп}}^1 \rightarrow 0$), как видно из (24), (25), оптимальным будет максимально инерционный человек-оператор ($\tau_{\text{оп}}^* \rightarrow \infty$), не вносящий управления в систему ($\langle u_{\text{оп}}^2 \rangle \rightarrow 0$). Если же коэффициент зашумленности мал ($\rho \rightarrow 0$) или оператор работает с большими требованиями к точности стабилизации ($\gamma_{\text{оп}}^1 \rightarrow \infty$), то оптимальным будет безынерционный оператор ($\tau_{\text{оп}}^* \rightarrow 0$) с интенсивностью управления $\langle u_{\text{оп}}^2 \rangle$, определяемой согласно (19). При этом, однако, следует иметь в виду, что реальный человек-оператор из-за чисто физиологических ограничений не может работать с постоянной времени, меньшей некоторой $\tau_{\text{min}} = 1/\beta_{\text{max}}$. Величина τ_{min} индивидуальна для каждого оператора и заключена в пределах 0,05—0,2 с [1, 9].

Интересно отметить, что, как следует из (27), включение человека-оператора в контур управления целесообразно только при достаточно высоком уровне его требований по точности стабилизации $\gamma_{\text{оп}}^1$, превышающем пороговое значение $\gamma_{\text{оп}}^2 > \gamma_{\text{пор}}^2 = 3\alpha^2\rho\gamma_{\text{оп}}^2$. В противном случае присутствие человека-оператора не приведет к выигрышу в точности по сравнению с неуправляемым развитием процесса ($s^* = 0$). С ростом требования по точности ($\gamma_{\text{оп}}^1 \gg \gamma_{\text{пор}}$) оптимальное значение коэффициента усиления исполнительного устройства стремится к предельному (см. (27)), величина которого обратно пропорциональна коэффициенту зашумленности системы ($s^* = \sqrt{1/\rho}$).

Полученные статистические характеристики контура ручного управления (18)—(22) и оптимальные параметры человека-оператора (17),

(24), (25) справедливы для стационарного режима. Используя (24) и (25), нетрудно найти следующее условие стационарной работы человека-машинной системы:

$$\frac{2\alpha^2 \gamma_{\text{оп}2}^2}{\gamma_{\text{оп}1}^2} V_p^- \leq s \leq \frac{\gamma_{\text{оп}1}}{2\alpha V_p^-} \quad (28)$$

или

$$V_p^- \leq \min [s(\gamma_{\text{оп}1}/\gamma_{\text{оп}2})^2/2\alpha^2, \gamma_{\text{оп}1}/\alpha s]. \quad (29)$$

Из (28), (29) видно, что предложенная модель человека-машинной системы функционирует стационарно и оптимально с точки зрения функционала (14) только в определенном диапазоне изменения коэффициента усиления исполнительного устройства или при уровне зашумленности системы, не превышающей порогового значения (29). Вне этого диапазона система теряет устойчивость, и оптимальным является отключение оператора из контура управления.

Для проверки адекватности предложенной модели человека-оператора была проведена серия экспериментов с операторами, отличающимися степенью тренированности (мужчины в возрасте 34—46 лет). Эксперименты проводились на специальном стенде, созданном на базе аналоговой машины, с помощью которой моделировались динамика управляемого процесса и возмущения внешней среды. Координата объекта отображалась в виде отклонения луча осциллографа, имеющего коэффициент усиления $h \text{ см}/B$. Движение ручки управления преобразовывалось в напряжение, которое после усиления (с коэффициентом s) подавалось на вход модели объекта управления. Оператору ставилась задача: перемещая ручку управления, по возможности удержать луч в центре экрана. В эксперименте измерялась дисперсия координаты управляемого объекта и интенсивность управляющих воздействий при различных коэффициентах усиления исполнительного (s) и индикаторного (h) устройств. Время работы оператора при одном испытании составляло 1 мин. Постоянная времени объекта управления была равной 1 с, интенсивность «белого» шума среды составляла $8,3 \text{ B}^2/\text{с}$.

В первом варианте экспериментов изменялся коэффициент усиления исполнительного устройства (s) при фиксированном значении чувствительности осциллографа ($h = 2 \text{ см}/B$). В данном варианте было проведено 15 серий экспериментов с тренированным (имеющим длительную тренажную подготовку) и нетренированными операторами. (Для исключения влияния «медленного» обучения нетренированного оператора эксперименты проводились с тремя различными испытуемыми по 5 серий с каждым.) Для обоих типов операторов данные экспериментов усреднялись по 15 проведенным сериям. Количество серий определялось требованием надежности выборочного среднего.

С целью сравнения экспериментальных результатов с теорией определялись параметры испытуемых операторов на языке предложенной модели ($\gamma_{\text{оп}1}, \gamma_{\text{оп}2}, j_{\text{оп}}$). (Шумы считывания и индикации предполагались пренебрежимо малыми.) Для нахождения параметров использовались формулы (18), (19), (27) и некоторые экспериментальные точки (обведенные на рис. 3—5 кружками). Оказалось, что испытуемые характеризовались следующими весовыми коэффициентами собственного функционала критерия качества:

$$\begin{aligned} \gamma_{\text{оп}1}^2 &= 220 \text{ c}^{-2}, & \gamma_{\text{оп}2}^2 &= 2 & (\text{тренированный} \\ &&&& \text{оператор}), \\ \gamma_{\text{оп}1}^2 &= 92 \text{ c}^{-2}, & \gamma_{\text{оп}2}^2 &= 64 & (\text{нетренированные} \\ &&&& \text{операторы}). \end{aligned} \quad (30)$$

Отметим, что для тренированного оператора требование по точности существенно превышает требование на экономию собственных энерготрат ($\gamma_{\text{оп}1}^2/\alpha^2 \gg \gamma_{\text{оп}2}^2$), в то время как для нетренированного оператора они имели одинаковый порядок. Интенсивность шума нервномышечной системы испытуемых и, следовательно, коэффициент зашумленности системы ρ были примерно одинаковыми для обоих типов операторов и оценивались величинами $j_{\text{оп}} = 0,13 B^2/c$, $\rho = 0,125$. Условие стационарности (28) выполнялось во всем исследованном диапазоне значений коэффициента усиления исполнительного устройства.

При найденных параметрах ($\gamma_{\text{оп}1}$, $\gamma_{\text{оп}2}$) функционала критерия качества работы оператора и уровне зашумленности ρ рассчитывались по формулам (24), (25) оптимальные значения параметров нервномышечной системы оператора (коэффициента усиления $\omega_{\text{оп}}^*$ и постоянной времени $\tau_{\text{оп}}^*$) как функции коэффициента усиления исполнительного устройства s . Теоретические зависимости $\omega_{\text{оп}}^*(s)$ и $\beta_{\text{оп}}^*(s) = 1/\tau_{\text{оп}}^*(s)$ представлены на рис. 1, 2 (сплошная линия дана для тренированного оператора, штриховая — нетренированного). Из рис. 1, 2 видно, что тренированный оператор работает с минимальной постоянной времени в значительном диапазоне коэффициентов усиления s и использует главным образом механизм настройки, связанный с изменением коэффициента усиления нервномышечной системы, тогда как нетренированный изменяет в основном ее постоянную времени $\tau_{\text{оп}}^*$ при относительно постоянном низком уровне коэффициента усиления нервномышечной системы $\omega_{\text{оп}}^*$.

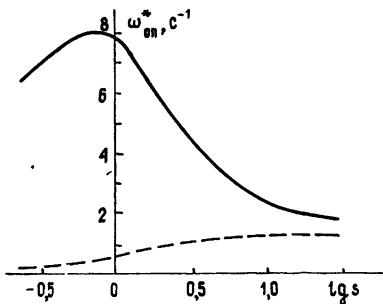


Рис. 1.

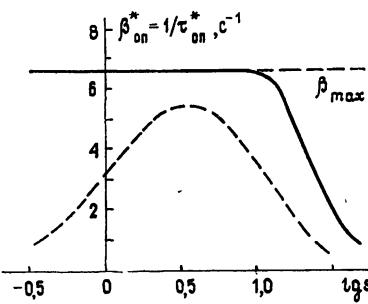


Рис. 2.

Для сравнения теоретических данных с измеряемыми экспериментально величинами предполагалось, что в процессе выполнения задания человек-оператор интуитивно подстраивает (адаптирует) свои параметры $\omega_{\text{оп}}$ и $\tau_{\text{оп}}$ к оптимальным, а уровни его требований остаются неизменными. На рис. 3, 4 приведены построенные при данном предположении теоретические кривые для относительной точности стабилизации координат объекта (по отношению к дисперсии неуправляемого развития процесса) $2\alpha \langle x^2 \rangle / q$ и интенсивности управляющего воздействия оператора $\lg \langle u_{\text{оп}}^2 \rangle$, а также представлены результаты экспериментальных измерений. Из рис. 3, 4 видно, что имеется весьма хорошее качественное и количественное совпадение теоретических и экспериментальных результатов. Отметим, что для обоих типов операторов наблюдается (см. рис. 3) минимум погрешности стабилизации координаты объекта в области значений коэффициента усиления исполнительного устройства $s \approx 7-8$. При этом тренированный человек-оператор обеспечивает более высокую точность в более широком диапазоне значений коэффициента s . Это достигается на фоне значительно большей интенсивности управления тренированного оператора (см. рис. 4). Как следует из рис. 1, 2, оптимальные параметры нервномышечной системы оператора

ра также имеют экстремумы при определенных значениях коэффициента усиления исполнительного устройства s , что хорошо качественно согласуется с результатами экспериментов, приведенными в работе [9].

Описанные выше эксперименты проводились при коэффициенте усиления индикатора $h = 2 \text{ см}/\text{В}$, который соответствовал хорошим условиям считывания информации оператором. Поэтому при моделировании предполагалось, что оценка координаты объекта человеком-оператором осуществляется точно ($\mu_{\text{оп}}^* \rightarrow \infty$, $\langle \tilde{x}_{\text{оп}}^2 \rangle \rightarrow 0$). В этом случае коэффициент зашумленности системы определялся только отношением интенсивностей шумов нервно-мышечной системы и внешней среды и считался постоянным в процессе проведения экспериментов. С целью более полной проверки адекватности предложенной модели была проведена дополнительная серия из 15 экспериментов с тренированным оператором при различных коэффициентах усиления осциллографа h в условиях фиксированного значения коэффициента усиления исполнительного устройства $s = 8$, соответствующего минимуму погрешности стабилизации координаты динамического объекта. В данном варианте эксперимента коэффициент зашумленности системы уже существенно зависит (при малых значениях h) от интенсивности шума наблюдения информации человеком-оператором ($r_{\text{оп}}$).

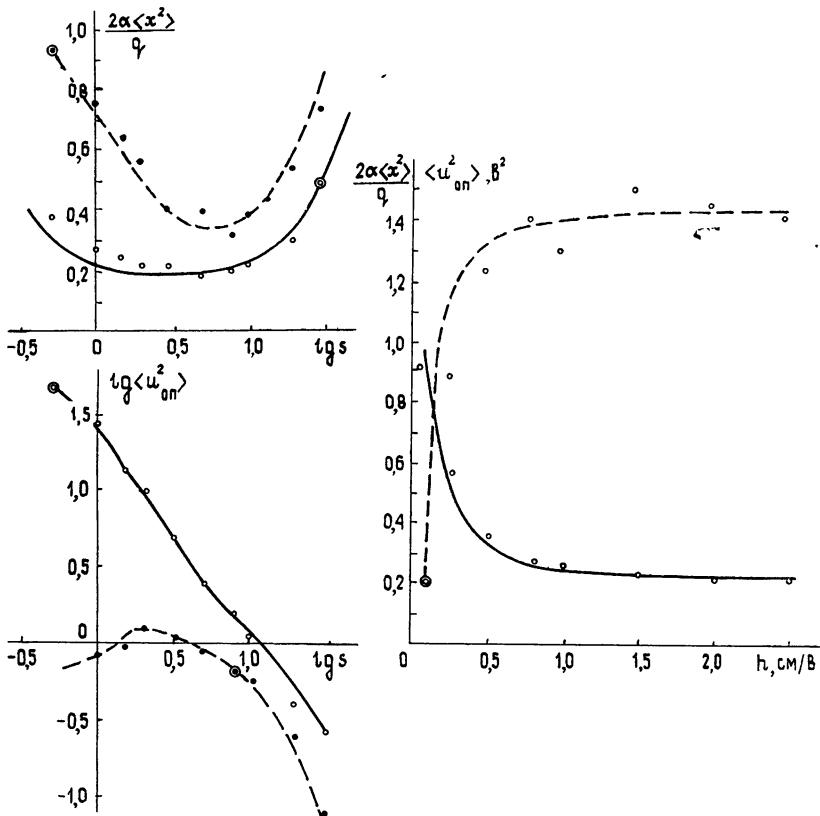


Рис. 3, 4, 5.

На рис. 5 представлены результаты экспериментальных измерений и теоретические кривые относительной точности стабилизации координаты объекта (сплошная линия) и интенсивности управляющего воздействия оператора (штриховая линия) в зависимости от чувствительности индикатора (h). Кривые строились при ранее определенных зна-

чениях коэффициентов функционала качества тренированного оператора $\gamma_{\text{оп}1}, \gamma_{\text{оп}2}$ (30) и интенсивности шума его нервномышечной системы $\mu_{\text{оп}} = 0.13 B^2/c$. Предполагалось, что человек-оператор, работающий по типу фильтра Калмана, по результатам наблюдения информации с индикаторного устройства подстраивает к оптимальным не только параметры нейромускульной системы ($\omega_{\text{оп}}, \tau_{\text{оп}}$), но и постоянную времени оценки координаты объекта ($1/\mu_{\text{оп}}$). Как видно из рис. 5, это предположение хорошо согласуется с результатами эксперимента. Отметим, что при $h > 1 \text{ см}/B$ человек-оператор работает практически с постоянной максимальной точностью и его управление не зависит от чувствительности осциллографа. Таким образом, не имеет смысла увеличивать чувствительность индикатора, начиная с некоторого значения: это приведет только к увеличению требуемых размеров экрана (шкалы) индикатора, но не увеличит точности стабилизации.

В целом результаты настоящей работы указывают на адекватность предложенной модели статистически оптимального взаимодействия человека-оператора с динамическим объектом, находящимся под воздействием случайных возмущений внешней среды, и позволяют надеяться, что предложенная модель может быть использована для описания и более сложных человеко-машинных систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бике (Bekey G A.) В кн: Современная теория систем управления. — М: Наука, 1970, с 454
2. Нафтульев А. И В кн: Методология исследований по инженерной психологии и психологии труда. — Ч. I. — Л: изд ЛГУ, 1974, с 39
3. Geiglach O H. — The aeronautical J., 1977, 81, VII, № 799, p. 293.
4. Таран В. А Эргатические системы управления — М: Машиностроение, 1976
5. Вагон S. — IEEE Trans. Rel., 1973, R-22, № 3, p. 157.
6. Phatak A. V., Kessler K. M. — Human Factor, 1977, 19, № 5, p. 447.
7. Адамович Н. В Управляемость машин — М: Машиностроение, 1977
8. Цибулевский И. Е — Автоматика и телемеханика, 1967, № 3, с 117.
9. Анохин П. К Биология и нейрофизиология условного рефлекса. — М: Наука, 1968.
10. Душкин Б. А, Ломов Б. Ф, Рубахин В. Ф, Смирнов Б. А Основы инженерной психологии. — М: Высшая школа, 1977.
11. Медич Дж Статистически оптимальные линейные оценки и управление. — М: Мир, 1973.

Горьковский государственный
университет

Поступила в редакцию
26 сентября 1980 г

ON STOCHASTIC MODEL OF HUMAN PERFORMANCE IN THE CONTOUR OF MANUAL CONTROL OF THE DYNAMIC SYSTEM

I. V. Kurochkin, A. A. Mal'tsev

A stochastic model of the man is investigated in the contour of manual control of the dynamic object being under the action of random disturbances of the surrounding medium and internal noises of the operator. Experimental check of the model is made for the problem of one-parametric stabilization of the first order dynamic object.