

А. Д. У с т ю ж а н и н

**ПРЕДЕЛЬНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЧЕЛОВЕКА-ОПЕРАТОРА ПРИ УПРАВЛЕНИИ ОБЪЕКТАМИ РАЗЛИЧНОГО ТИПА**

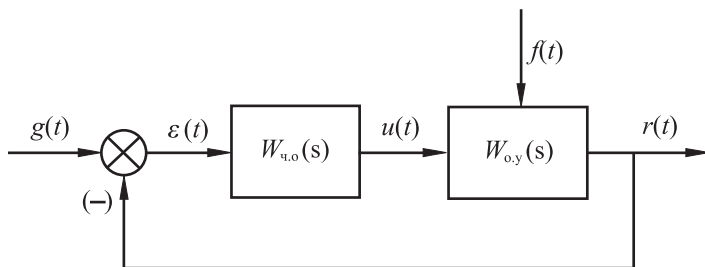
*Рассмотрена динамика системы человек–машина и определены предельные значения параметров динамических характеристик для объектов управления различных типов, при которых обеспечивается необходимый запас устойчивости по фазе и желаемый вид реакции системы на единичное воздействие.*

Проблема обеспечения устойчивости и желаемого качества процессов управления в системах человек–машина остается весьма актуальной в силу возрастающей сложности самих объектов управления и круга решаемых ими задач.

Во многих работах, посвященных исследованию систем с участием оператора [1–4], основное внимание уделяется методам определения ее динамических свойств. Однако практически отсутствуют результаты исследований, по которым можно судить о предельных возможностях человека-оператора при управлении объектами различного типа.

Поэтому целесообразно оценить, каким образом действия человека-оператора влияют на качество и устойчивость работы системы человек–машина. Для этого рассмотрим, какие типы объектов управления существуют и какие цели стоят перед ними. Обратимся к системе, структурная схема которой приведена на рис. 1:  $W_{о.у.}$  — передаточная функция объекта управления;  $W_{ч.о.}$  — передаточная функция человека-оператора;  $\varepsilon(t)$  — ошибка системы;  $u(t)$  — управление;  $f(t)$  — возмущающее воздействие;  $g(t)$  и  $r(t)$  — вход и выход системы.

Сведем управляемые объекты и типичные задачи управления в табл. 1.



**Рис. 1. Структурная схема системы человек–машина**

Передаточная функция	Задачи управления
1. $W_{o.y}(s) = \frac{K_c}{s} = \frac{r(s)}{u(s)}$ ; $K_c = K_{\text{ЛА}} = 23,0$	Управление углом подъема самолета при помощи руля высоты; управление направлением движения автомобиля при малых углах поворота рулевого колеса.
2. $W_{o.y}(s) = \frac{K_{\text{ЛА}}}{s^2} = \frac{r(s)}{u(s)}$ ; $K_{\text{ЛА}} = 23,0$	Управление пространственным положением космического корабля с помощью управляющих реактивных двигателей; управление ракетой-носителем путем изменения силы тяги.
3. $W_{o.y}(s) = \frac{K_{\text{ЛА}}}{s\left(s + \frac{1}{T_{\text{ЛА}}}\right)} = \frac{r(s)}{u(s)}$ ; $K_{\text{ЛА}} = 23$ ; $T_{\text{ЛА}} = 1$	Управление углом крена самолета с помощью элеронов; управление самолетом с вертикальным взлетом (в режиме зависания) путем изменения силы тяги.
4. $W_{o.y}(s) = \frac{1}{s - \frac{1}{T_{\text{ЛА}}}} = \frac{r(s)}{u(s)}$ ; $T_{\text{ЛА}} = 1$	Управление углом атаки статически неустойчивого самолета с помощью руля высоты.
5. $W_{o.y}(s) = \frac{K_{\text{ЛА}}(T_{\text{ЛА}1}s + 1)}{T_{\text{ЛА}2}^2 s^2 + 2\xi_{\text{ЛА}2}T_{\text{ЛА}2}s + 1} = \frac{r(s)}{u(s)}$ ; $T_{\text{ЛА}1} = 0,17 \text{ с}$ , $K_{\text{ЛА}2} = 23$ ; $T_{\text{ЛА}2} = 0,05 \text{ с}$ , $\xi_{\text{ЛА}2} = 0,4$	Управление угловой скоростью тангажа самолета

В качестве исходных данных для исследования устойчивости систем человек–машина будем использовать следующие значения, отражающие реальные свойства технических систем, приведенных в табл. 1, а именно:

$$K_{\text{ЛА}} = K_c = 23,0; T_{\text{ЛА}} = 1 \text{ с}; T_{\text{ЛА}1} = 0,17 \text{ с}; T_{\text{ЛА}2} = 0,05 \text{ с}; \xi_{\text{ЛА}2} = 0,4.$$

Запишем передаточную функцию [2]

$$W_{ч.о.} = K_{\text{П}} e^{-\tau s} \frac{T_1 s + 1}{T_2^2 s^2 + 2\xi_2 T_2 s + 1}, \quad (1)$$

где  $K_{\text{П}} = 0,30$ ,  $\tau = 0,19 \text{ с}$ ;  $T_1 = 0,28 \text{ с}$ ;  $T_2 = 0,33 \text{ с}$ ;  $\xi_2 = 0,6$  являются средними значениями нескольких параметров.

Цель исследования состоит в определении допустимых значений передаточной функции человека-оператора, при которых система человек–машина устойчива и удовлетворяет заданным требованиям по качеству работы.

Рассмотрим случай 1 (см. табл. 1), когда управляемый объект — самолет на взлете (при помощи руля высоты управляют углом наклона траектории), либо автомобиль (при малых углах поворота рулевого колеса управляют направлением движения).

Передаточная функция разомкнутой системы в этом случае будет иметь вид

$$W(s) = W_{ч.о.}(s)W_{о.у.}(s) = \frac{K_{\Pi}e^{-\tau s}(T_1s + 1)K_{\text{ЛА}}}{(T_2^2s^2 + 2\xi_2T_2s + 1)s}. \quad (2)$$

Ставится задача оценки влияния параметров  $K_{\Pi}$ ,  $\tau$ ,  $T_1$ ,  $T_2$  и  $\xi_2$  на устойчивость системы в замкнутом состоянии. Особый интерес представляет чистое запаздывание  $\tau$ , упреждение, определяемое постоянной времени  $T_1$ , и коэффициент усиления разомкнутой системы  $K_{\Pi}K_{\text{ЛА}} = K_p$ .

Постоянную времени  $T_2$  и демпфирование  $\xi_2$  колебательного звена в функции (2) можно принять 0,33 с и 0,6 соответственно, так как они изменяются незначительно.

Сначала в пространстве параметров  $K_p$  — коэффициента усиления разомкнутой системы и  $T_1$  — постоянной времени определим область устойчивости системы в замкнутом состоянии, а затем — допустимое чистое запаздывание  $\tau = \tau_d$ , при котором запас устойчивости по фазе составляет не меньше  $30^\circ$ .

Область устойчивости для данного варианта рассчитываем на основе метода  $D$ -разбиений следующим образом. Характеристический полином для системы (2) будет иметь вид

$$D(\lambda) = T_2^2\lambda^3 + 2\xi_2T_2\lambda^2 + (1 + K_pT_1)\lambda + K_p. \quad (3)$$

Подставляя  $\lambda = j\omega$  в выражение (3), раскрывая скобки и выполняя необходимые преобразования, получим

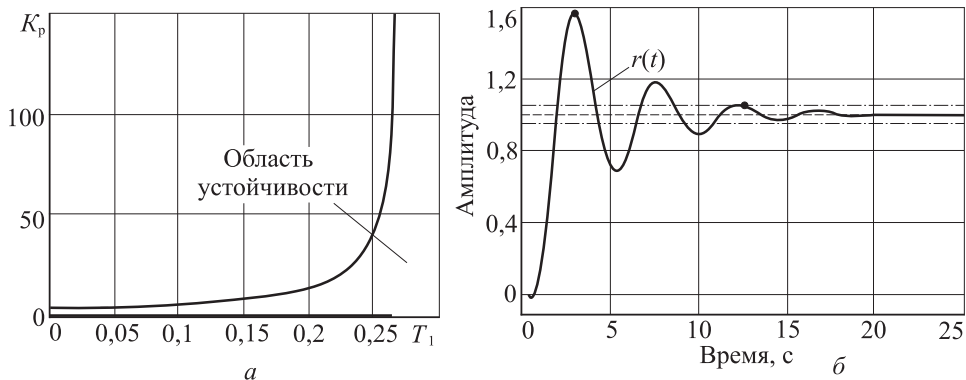
$$D(j\omega) = (K_p - 2\xi_2T_2\omega^2) + j\omega(1 + K_pT_1 - T_2\omega^2) = 0 \quad (4)$$

или в виде системы уравнений

$$\begin{cases} X(\omega, T_1, K_p) = (K_p - 2\xi_2T_2\omega^2) = 0; \\ Y(\omega, T_1, K_p) = \omega(1 + K_pT_1 - T_2\omega^2) = 0. \end{cases} \quad (5)$$

Изменяя  $\omega$  от 0 до  $\infty$  как параметр и решая систему (5) относительно параметров  $T_1(\omega)$  и  $K_p(\omega)$ , выделим область устойчивости в пространстве указанных параметров.

Аналогично рассчитаем области устойчивости для объектов управления других типов.



**Рис. 2.** Графическое представление области устойчивости технической системы (п. 1, см. табл. 1) (а) и переходного процесса для  $T_1 = 0,15$  с,  $K_p = 1,0$  с $^{-1}$  и  $\tau_d = 0,7367$  с (б)

Графическое представление этой области для данного случая приведено на рис. 2, а, в табл. 2 приведены значения  $\tau = \tau_d$ . Переходный процесс, как реакция замкнутой системы на единичное воздействие  $g(t) = 1$ , приведен на рис. 2, б для значений  $T_1 = 0,15$  с;  $K_p = 1,0$  с $^{-1}$  и  $\tau_d = 0,7367$  с. Переходный процесс здесь и далее определяли, основываясь на частотном методе, используя пакет Matlab.

Таблица 2

Параметры	$\tau_d, \text{с}^{-1}$			
	$K_p = 1$	$K_p = 5$	$K_p = 10$	$K_p = 20$
$T_1 = 0,10$ с	0,6964	Нет запаса устойчивости	Неустойчивая система	Неустойчивая система
$T_1 = 0,15$ с	0,7367	То же	То же	То же
$T_1 = 0,20$ с	0,7746	--	--	--
$T_1 = 0,25$ с	8,8101	--	--	Нет запаса устойчивости
$T_1 = 0,30$ с	0,8371	--	--	То же

Таким образом, для рассматриваемого объекта управления можно определить желаемые значения передаточной функции, при которых обеспечивается устойчивость системы.

Желаемый вид переходного процесса как реакции на единичное воздействие можно получить, варьируя параметры  $T_1$ ,  $\tau_d$  и  $K_p$ , оставаясь в области устойчивости системы.

При управлении космическим аппаратом передаточная функция разомкнутой системы будет иметь вид

$$W(s) = \frac{K_{\Pi} e^{-s\tau} (T_1 s + 1)}{(T_2^2 s^2 + 2\xi_2 T_2 s + 1)} \cdot \frac{K_{\text{ЛА}}}{s^2}. \quad (6)$$

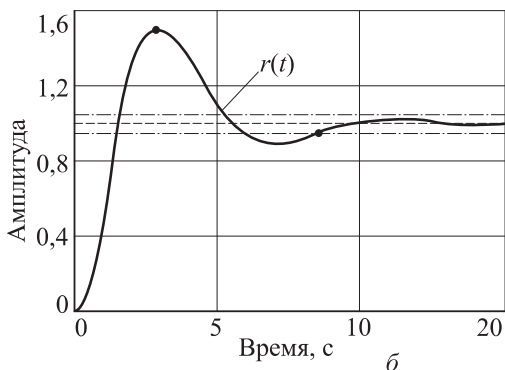
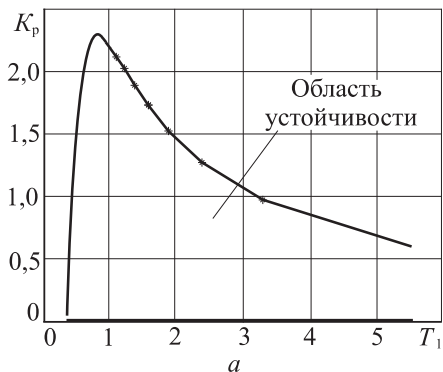


Рис. 3. Графическое представление области устойчивости (а) и переходного процесса системы (п. 2, см. табл. 1) при  $T_1 = 0,15$  с;  $K_p = 0,5$  с $^{-1}$  и  $\tau_d = 0,0427$  с (б)

Область устойчивости такой системы показана на рис. 3, а, максимально допустимые величины запаздывания  $\tau_d$  приведены в табл. 3.

Таблица 3

Параметры	$\tau_d, \text{с}^{-1}$			
	$K_p = 0,5$	$K_p = 0,75$	$K_p = 1,0$	$K_p = 2,0$
$T_1 = 0,5$ с	Нет запаса устойчивости	Нет запаса устойчивости	Нет запаса устойчивости	Неустойчивая система
$T_1 = 0,75$ с	То же	То же	То же	Нет запаса устойчивости
$T_1 = 1,0$ с	--	--	--	То же
$T_1 = 1,25$ с	--	--	--	Неустойчивая система
$T_1 = 1,50$ с	0,0427	0,0067	--	То же

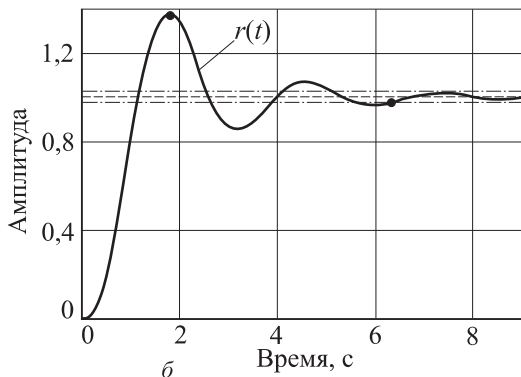
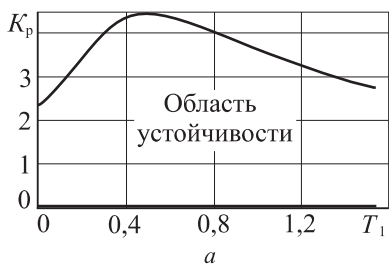
Из данных табл. 3 видно, что только при весьма малых величинах запаздывания можно обеспечить устойчивую работу системы. Это свидетельствует о большой сложности динамики объекта управления.

Реакция данной системы при  $T_1 = 0,15$  с;  $K_p = 0,5$  с $^{-1}$  и  $\tau_d = 0,0427$  с приведена на рис. 3, б.

При управлении самолетом с помощью элеронов и путем изменения силы тяги (п. 3, см. табл. 1) передаточная функция разомкнутой системы будет иметь следующий вид:

$$W(s) = \frac{K_{\Pi} e^{-\tau s} (T_1 s + 1) K_{\text{ЛА}}}{(T_2^2 s^2 + 2\xi_2 T_2 s + 1) \left( s + \frac{1}{T_{\text{ЛА}}} \right) s} \quad (7)$$

Область устойчивости для данной системы показана на рис. 4, а. Значения чистого запаздывания  $\tau_d$ , при которых обеспечивается запас



**Рис. 4. Графическое представление области устойчивости системы (п. 3, см. табл. 1) (а) и переходного процесса для  $T_1 = 0,75$  с,  $K_p = 2,0$  с $^{-1}$  и  $\tau_d = 0,0776$  с**

устойчивости не менее  $30^\circ$ , приведены в табл. 4, из которой видно, что данным объектом человек-оператор может управлять при достаточно широком диапазоне значений запаздывания  $\tau_d$ .

Таблица 4

Параметры	$\tau_d, \text{с}^{-1}$			
	$K_p = 1,0$	$K_p = 2,0$	$K_p = 2,5$	$K_p = 3,0$
$T_1 = 0,1$ с	0,1575	Нет запаса устойчивости	Нет запаса устойчивости	Неустойчивая система
$T_1 = 0,25$ с	0,2916	То же	То же	Нет запаса устойчивости
$T_1 = 0,50$ с	0,4709	0,0442	—/—	То же
$T_1 = 0,75$ с	0,5780	0,0776	—/—	—/—
$T_1 = 1,0$ с	0,5982	0,0324	—/—	—/—

Переходный процесс в системе при единичном воздействии при  $T_1 = 0,75$  с;  $K_p = 2$  с $^{-1}$  и  $\tau_d = 0,0776$  с приведен на рис. 4, б.

Для объекта управления (п. 4, см. табл. 1) передаточная функция разомкнутой системы имеет вид

$$W(s) = \frac{K_{\text{п}} e^{-\tau s} (T_1 s + 1)}{(T_2^2 s^2 + 2\xi_2 T_2 s + 1)} \cdot \frac{1}{s - \frac{1}{T_a}} \quad (8)$$

Область устойчивости для данной системы приведена на рис. 5, а, а допустимые значения запаздывания  $\tau_d$  приведены в табл. 5. Из таблицы следует, что для управления таким объектом допустимые значения запаздывания весьма малы, что свидетельствует о сложности динамики объекта управления.

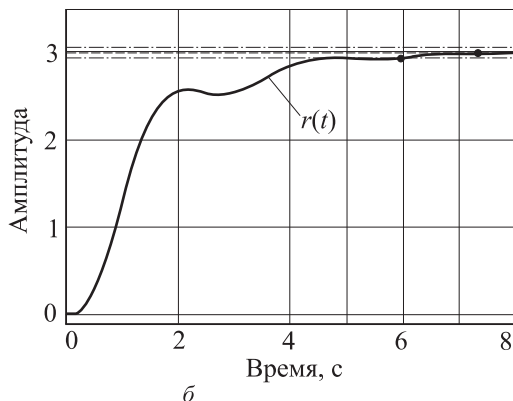
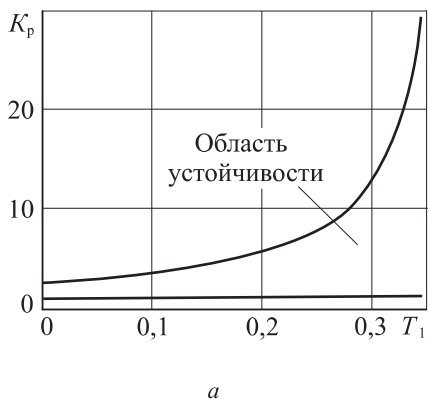


Рис. 5. Графическое представление области устойчивости (а) и переходного процесса системы (п. 4, см. табл. 1) при  $T_1 = 0,3$  с,  $K_p = 1,5$  с $^{-1}$  и  $\tau_d = 0,1526$  с

Таблица 5

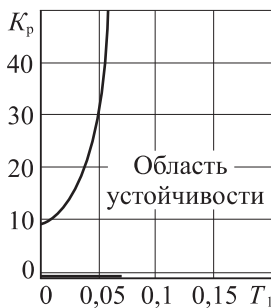
Параметры	$\tau_d, \text{с}^{-1}$			
	$K_p = 1,5$	$K_p = 2,0$	$K_p = 3,0$	$K_p = 5,0$
$T_1 = 0,1$ с	Нет запаса устойчивости	Нет запаса устойчивости	Нет запаса устойчивости	Неустойчивая система
$T_1 = 0,15$ с	0,0157	То же	То же	То же
$T_1 = 0,20$ с	0,0642	0,0088	—/—	Нет запаса устойчивости
$T_1 = 0,30$ с	0,1526	0,0595	—/—	То же
$T_1 = 0,35$ с	0,1892	0,0706	—/—	—/—

Реакция замкнутой системы на единичное воздействие графически показана на рис. 5, б для параметров  $T_1 = 0,3$  с;  $K_p = 1,5$  с $^{-1}$  и  $\tau_d = 0,1526$  с.

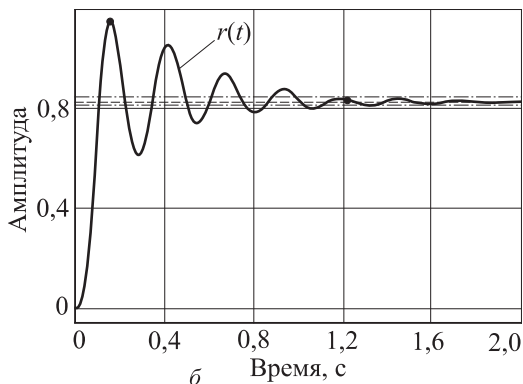
Для объекта управления 5 (см. табл. 1) передаточная функция разомкнутой системы будет иметь вид

$$W(s) = \frac{K e^{-\tau s} (T_1 s + 1) (K_{\text{ЛА}} (T_{\text{ЛА}} s + 1))}{(T_2^2 s^2 + 2\xi_2 T_2 s + 1) (T_{\text{ЛА}2}^2 s^2 + 2\xi_{\text{ЛА}2} T_{\text{ЛА}2} s + 1)}, \quad (9)$$

Область устойчивости для этой системы приведена на рис. 6, а, допустимые значения запаздывания  $\tau_d$  приведены в табл. 6. Видно, что значения запаздывания могут изменяться в достаточно широком диапазоне. Переходный процесс такой системы для  $T_1 = 0,1$  с;  $K_p = 5$  с $^{-1}$  и  $\tau_d = 0,0141$  с приведен на рис. 6, б.



а



б

**Рис. 6. Графическое представление области устойчивости технической системы (п. 5, см. табл. 1) (а) и переходного процесса (б) при  $T_1 = 0,1$  с,  $K_p = 5,0$  с $^{-1}$  и  $\tau_d = 0,0141$  с**

Таблица 6

Параметры	$\tau_d, \text{с}^{-1}$			
	$K_p = 1,0$	$K_p = 5,0$	$K_p = 10,0$	$K_p = 20,0$
$T_1 = 0,05$ с	0,5675	0,0527	Нет запаса устойчивости	Нет запаса устойчивости
$T_1 = 0,10$ с	0,5682	0,0141	То же	То же
$T_1 = 0,20$ с	0,5021	0,0013	--/--	--/--
$T_1 = 0,30$ с	0,3975	Нет запаса устойчивости	--/--	--/--
$T_1 = 0,50$ с	0,0386	То же	--/--	--/--

Результаты исследований и расчетов, приведенные в настоящей статье, позволяют назначать требования к динамическим характеристикам человека-оператора при управлении объектами определенного класса. В тех случаях, когда требуемые предельные значения динамических характеристик не достижимы для человека-оператора, необходимо вводить динамическую коррекцию в контур управления системы человек-машина или изменять динамику объекта управления.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sheridan T. B., Ferrell W. R. Man-Machine Systems. – Cambridge-London: The MIT Press, 1974.
2. Poupkoff K. The optimization of connection between Human being and techniques in Man-Machine Systems // Preprint of the IFAC-IFORS Symposium (Warna, Bulgaria, 8–10 oct. 1974. – P. 419–426.
3. Пупков К. А., Капалин В. И., Ющенко А. С. Функциональные ряды в теории нелинейных систем. – М.: Наука, 1976. – 448 с.
4. Пупков К. А., Устюжанин А. Д. Идентификация и оценка обученности в динамических человеко-машинных системах // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. “Приборостроение”. – 2003. – № 4. – С. 95–103.