

## **ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ЧЕЛОВЕКА-ОПЕРАТОРА В ЧЕЛОВЕКО-МАШИННЫХ СИСТЕМАХ ПРИ ВИБРАЦИИ**

**К.А. Пупков, А.Д. Устюжанин**

Московский государственный технический  
университет им. Н.Э. Баумана  
*Ул. 2-я Бауманская, 5, Москва, Россия, 105005*

Рассмотрен способ оценки эффективности работы человека-оператора в системах «человек—машина» при получении сведений по информационному каналу и при воздействии вибрации. Показано, что вес ошибки из-за воздействия вибрации выше, чем ее вес по информационному каналу при одинаковом уровне воздействий.

**Ключевые слова:** человек-оператор, эффективность контроля, вибрация, точность.

В большинстве случаев человеку приходится длительное время испытывать воздействия вибрации (человек-оператор, пассажир транспортных средств и др.). Как правило, вибрация оказывает вредное влияние на человека. Уменьшению интенсивности вибрационного воздействия на человека способствует снижение виброактивности источника вибрации, применение систем виброизоляции и регламентирования допустимых уровней вибрации на рабочем месте оператора. Для расчета систем виброзащиты человека используются данные о механических свойствах и частотных характеристиках тела человека [1]. Не отрицая важности сказанного, рассмотрим, каким образом можно оценить влияние воздействия вибрации на динамические свойства человека-оператора и на эффективность его деятельности при получении сведений по информационным каналам, выработку и исполнение управления тем или иным объектом или процессом. Под эффективностью работы человека-оператора здесь будем понимать величину дисперсии выходного сигнала системы, обусловленную вибрацией. Чем меньше эта дисперсия, тем выше эффективность.

Проведены обширные исследования по оценке влияния вибрации на тело человека-оператора [1].

Показано, каким образом можно динамические свойства человека-оператора при получении им сведений по информационному каналу [2—4], определены предельные значения параметров динамических характеристик человека-оператора при управлении объектами различного типа [5]. Некоторые результаты по исследованию влияния вибрации в системах «человек—машина» приведены в работе [6]. При выполнении человеком-оператором слежения по двум координатам за точечной целью при воздействии на него случайной вибрации в диапазоне от 5 гц, уровень которой возрастает, происходит не только увеличение дисперсии ошибки слежения, но и меняется вид плотности вероятности этой ошибки, так как плотность становится бимодальной [1]. Все это свидетельствует о необходимости оцен-

ки влияния вибрационных воздействий на человека-оператора при управлении им объектами по информационным каналам.

При малых колебаниях и достаточно малых частотах возбуждения (до 100 Гц) тело человека можно рассматривать как вязкоупругую механическую систему. Тогда динамические свойства тела человека-оператора можно описать с помощью частотных характеристик:

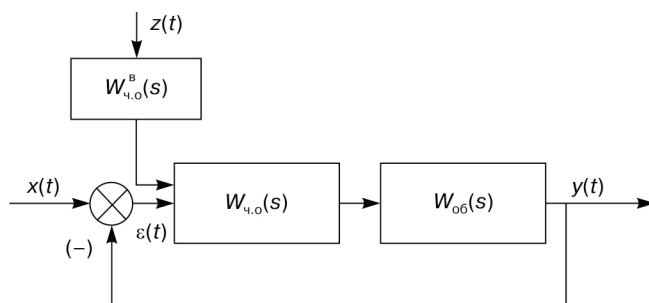
— передаточной функции  $G(j\omega)$ , как отношение преобразования Фурье вынужденных колебаний точки наблюдения на его теле к преобразованию Фурье сигнала источника возбуждения вибрации;

— входного механического импеданса  $Z(j\omega)$  для описания связи между силой, передаваемой телу и виброскоростью точки приложения силы, т.е. отношение преобразования Фурье виброскорости точки приложения силы к преобразованию Фурье процесса изменения силы.

Строго говоря, динамические свойства человека-оператора следует описывать так, как это показано в [2], только тестовый сигнал должен имитировать вибрационное воздействие.

Однако в этой работе мы воспользуемся материалами из [1] и покажем на конкретной задаче, каким образом можно оценить влияние вибрации на эффективность работы оператора в системе «человек—машина» при получении им сведений по информационному каналу.

Рассмотрим систему «человек—машина», структурная схема которой представлена на рис. 1.



**Рис. 1.** Структурная схема системы «человек—машина» с учетом вибрации:

$x(t)$  — входной сигнал по информационному каналу;  $z(t)$  — вибрация на рабочем месте оператора;  $\varepsilon(t)$  — ошибка системы;  $y(t)$  — выходной сигнал;

$W_{ч.о}(s)$  — передаточная функция человека—оператора,

$W_{об}(s)$  — передаточная функция объекта управления

Из работы [2] возьмем следующую функцию:

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

где  $s$  — символ преобразования Лапласа (при переходе в частотную область  $s = j$ );  $W_{об}(s) = KЛА/S$  — передаточная функция объектов управления (летательного аппарата ЛА). Эта передаточная функция приближенно отражает динамику самолета при управ-

лении высотой;  $W_{ч,о}^B(s)$  — передаточная функция человека-оператора от точки приложения вибрации до точки наблюдения на теле оператора;  $Z(t)$  — вибрационное воздействие.

Сигналы  $x(t)$  и  $z(t)$  являются случайными функциями времени.

На рис. 1 показано, что вибрационное воздействие  $Z(t)$  через передаточную функцию  $W_{ч,о}^B(s)$  влияет на выходной сигнал системы  $y(t)$  — регулируемую величину.

Задача состоит в том, чтобы оценить дисперсию ошибки  $\varepsilon(t) - \sigma_\varepsilon^2$  и дисперсии выходного сигнала  $y(t) - \sigma_y^2$ , обусловленную воздействием вибрации.

В качестве исходных данных возьмем спектральную плотность  $S_{a_{z_0}}(f)$  ускорений на рабочем месте летчика на самолете F-4C [1], показанную на рис. 2 (см. [1]).

Поскольку при управлении высотой самолета имеет место в основном вертикальная вибрация, то в качестве рабочей позы человека примет схему, показанную на рис. 3.

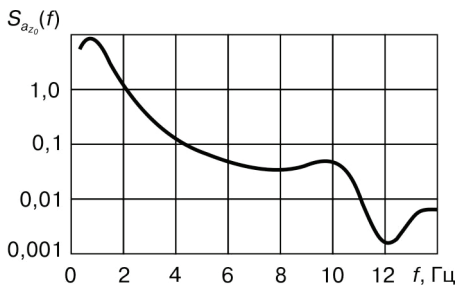


Рис. 2. Спектральная плотность вибраций на рабочем месте летчика на самолете F-4C



Рис. 3. Рабочая поза человека-оператора

На схеме, показанной на рис. 3,  $a_{z_0}$  — вибрационное ускорение на рабочем месте,  $a_{z_1}$  — вибрационное ускорение, измеренное на голове оператора по вертикальной оси.

Амплитудная частотная характеристика для указанной рабочей позы человека имеет вид, показанный на рис. 4 [см. [1]].

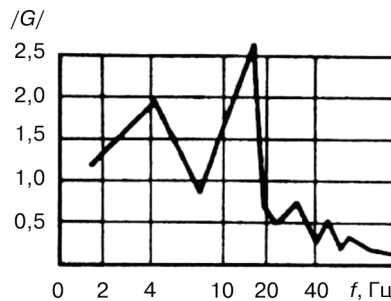


Рис. 4. Амплитудная частотная характеристика человека-оператора

На рис. 4  $A(f) = \frac{a_{z_1}(f)}{a_{z_0}(f)}$ , где  $f$  — частота в Гц.

Далее для оценки влияния вибрации на эффективность работы человека-оператора используем экспериментальные данные, приведенные в [1]. Предположим также, что вибрация головы человека-оператора приводит к ошибкам восприятия информации по информационному каналу и непосредственно влияет на регулируемую величину  $y(t)$ .

При получении оценки влияния вибрации представим спектральную плотность (см. рис. 2) приближенно в виде равномерной спектральной плотности с уровнем

$$C_2^2 = \frac{0,3}{\text{см}} \frac{\text{м}^2}{\text{с}^3 \text{рад}} = S_z(\omega) \quad (2)$$

в полосе частот от 0 до  $10 \cdot 2\pi$  рад/с.

Частотную характеристику, показанную на рис. 4, также приближенно представим с помощью передаточной функции:

$$W'_{\text{ч.о.}}(s) = \frac{K_4 K_5 K_6}{(T_4^2 s^2 + 2\xi_4 T_4 s + 1)(T_5^2 s^2 + 2\xi_5 T_5 s + 1)(T_6^2 s^2 + 2\xi_6 T_6 s + 1)}, \quad (3)$$

где  $T^4 = \frac{1}{8\pi} \text{с}$ ;  $T^5 = \frac{1}{32\pi} \text{с}$ ;  $T^6 = \frac{1}{64\pi} \text{с}$ ;

$$K_4 \cdot K_5 \cdot K_6 = 1,33;$$

$$\xi_4 = 0,385; \xi_5 = 0,021; \xi_6 = 0,005.$$

Это описание динамических свойств человека-оператора по отношению к вибрации выполнено приближенно с помощью трех колебательных звеньев с резонансными частотами 4, 16 и 32 Гц/с на основе экспериментальных данных, приведенных в работе [1].

Считаем, что входной сигнал  $x(t)$  по информационному каналу является случайной функцией времени со спектральной плотностью:

$$S_x(\omega) = C_x^2 \left| \frac{K_3}{T_3 j\omega + 1} \right|^2. \quad (4)$$

В соответствии с рис. 1 передаточная функция по ошибке системы будет

$$\Phi_\varepsilon(s) = \frac{E(s)}{X(s)} = \frac{s(T_2^2 s^2 + 2\xi_2 T_2 + 1)}{T_2^2 s^3 + 2\xi_2 T_2 s^2 + s(1 + K_{\text{ЛА}} K_{\text{П}} l^{-\sigma\tau} T)_1 + K_{\text{ЛА}} K_{\text{П}} l^{-\sigma\tau}}, \quad (5)$$

а передаточная функция по возмущению, вызванному вибрацией, будет иметь следующий вид:

$$\Phi_B(s) = \frac{Y(s)}{Z(s)} = \frac{W_{\text{ч.о.}}(s)W_{\text{об.}}(s)}{1 + W_{\text{ч.о.}}(s)W_{\text{об.}}(s)} \quad (6)$$

или

$$\Phi_B(s) = \frac{K_{\Pi} K_{\text{ЛЛА}} K_4 K_5 K_6}{\left[ T_2^2 s^3 + 2\xi_2 T_2 s^2 + s(1 + K_{\text{ЛЛА}} K_{\Pi} I^{-\sigma\tau} T_1) + K_{\text{ЛЛА}} K_{\Pi} I^{-\sigma\tau} \right]} \times \frac{1}{\left( T_4^2 s^2 + 2\xi_4 T_4 s + 1 \right) \left( T_5^2 s^2 + 2\xi_5 T_5 + 1 \right) \left( T_6^2 s^2 + 2\xi_6 T_6 s + 1 \right)}. \quad (7)$$

Вспользуемся известной формулой для определения дисперсий сигнала ошибки  $\varepsilon(t)$  и изменений выходного сигнала  $y(t)$  от воздействия вибрации на человека-оператора, получим

$$\tau_{\varepsilon}^2 = \int_{-\infty}^{\infty} \left| \Phi_{\varepsilon}(j\omega) \right|^2 S_x(\omega) d\omega, \quad (8)$$

$$\tau_y^2 = \int_{-\infty}^{\infty} \left| \Phi_B(j\omega) \right|^2 S_z(\omega) d\omega. \quad (9)$$

Теперь, используя формулы (2)—(7) и предполагая без потери качества, что  $S_x(\omega) = \frac{c_x^2}{2\pi}$  и  $W_{\text{чо}}^B(s) = 1$ , получим для спектральных плотностей  $S_{\varepsilon}(\omega)$  и  $S_y(\omega)$  следующие выражения:

$$S_{\varepsilon}(\omega) = \frac{c_x^2}{2\pi} \left| \frac{T_2^2 (j\omega)^2 + 2\xi_2 T_2 j\omega + 1}{T_2^2 (j\omega)^3 + 2\xi_2 T_2 (j\omega)^2 + j\omega(1 + K_{\Pi} K_{\text{ЛЛА}} T_1) + K_{\Pi} K_{\text{ЛЛА}}} \right|^2, \quad (10)$$

$$S_y(\omega) = \frac{c_z^2}{2\pi} \left| \frac{K_{\Pi} K_{\text{ЛЛА}} T_1 j\omega + K_{\Pi} K_{\text{ЛЛА}}}{T_2^2 (j\omega)^3 + 2\xi_2 T_2 (j\omega)^2 + (1 + K_{\Pi} K_{\text{ЛЛА}} T_1) j\omega + K_{\Pi} K_{\text{ЛЛА}}} \right|^2. \quad (11)$$

При значениях  $T_1 = 0,2$ ;  $T_2 = 0,2$ ;  $\tau = 0,22$ ;  $\xi_2 = 0,6$  и  $K_{\Pi} K_{\text{ЛЛА}} = 1$  конкретные значения дисперсий  $\tau_{\varepsilon}^2$  и  $\tau_y^2$  будут равны:

$$\tau_{\varepsilon}^2 = 0,35c_x^2, \quad \tau_y^2 = 0,5c_z^2. \quad (12)$$

Анализируя оценки (12), можно видеть, что они зависят от параметров системы «человек—машина» и уровня воздействий  $x(t)$  и  $z(t)$ . Однако видно, что отклонение выходного сигнала  $y(t)$  из-за воздействия вибрации на человека имеет больший вес, чем ошибка  $\varepsilon(t)$  при слежении по информационному каналу.

Таким образом, нами впервые показано, каким образом можно оценить величины ошибок человека-оператора в системах «человек—машина» при получении им сведений по информационному каналу и при воздействии вибрации.

Показано, что в рассматриваемом случае вес ошибки при воздействии вибрации при одинаковом уровне воздействий  $C_x^2$  и  $C_z^2$  выше, чем при получении сведений по информационному каналу.

ПРИМЕЧАНИЕ

- (1) Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, Проект № 09-08-00255-а.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Защита от вибрации и ударов. Т. 6 / Под ред. К.В. Фролова. — М.: Машиностроение, 1995.
- [2] *Poupkoff K.* The optimization of connection between Human and techniques in Man—Machine Systems // Preprints of JFAC-JFORS Symposium (Varna, Bulgaria, 8—11 oct. 1974). — P. 419—426.
- [3] *Sheridan T.B., Ferrell W.R.* Man-Machine Systems. — Cambridge/London: The Press, 1974.
- [4] *Пупков К.А., Устюжанин А.Д.* Идентификация и оценка обученности в динамических человеко-машинных системах // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. — 2003. — 4(53). — С. 95—103.
- [5] *Ustyuzhanin A., Sheridan T., Pupkov K., Mc Ruer P., Krendel E.* Limited Parameters of Dynamic Characteristics of a Human-Operator When Operating Objects of Different Types. European Conference for Aerospace Sciences, July 407, 2005. Moscow. Russia.
- [6] *Устюжанин А.Д.* Исследование динамики систем «человек—машина» при воздействии вибрации. Интеллектуальные системы // Труды Шестого международного симпозиума. — М.: Русаки, 2004. — С. 125—127.

**ESTIMATION OF PERFORMANCE OF MAN-OPERATOR  
IN MAN-MACHINE SYSTEMS BY VIBRATION**

**К.А. Pupkov, A.D. Ustyuzhanin**

Automatic Control Systems Department  
Bauman Moscow State Technical University  
2-nd Baumanskaya str., 5, Moscow, Russia, 105005

A way of estimating the performance of the man-operator in man-machine systems by obtaining data from the informational channel and under influence of vibrations is considered. It is shown that the weight of an error due to vibration is higher than that by informational channel for the level of vibrations.

**Key words:** man-operator, efficiency of control, vibration, accuracy.