

К. А. Пупков, А. Д. Устюжанин,
В. Д. Шашурин

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ВИБРАЦИИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ ЧЕЛОВЕКА- ОПЕРАТОРА В ЧЕЛОВЕКО-МАШИННЫХ СИСТЕМАХ

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.

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]. Рассмотрим, каким образом можно оценить воздействие вибрации на динамические свойства человека-оператора и на эффективность его деятельности при получении сведений по информационным каналам, на 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.

Известно [1], что проведены обширные исследования по оценке влияния вибрации на тело человека-оператора.

В работах [2–4] показано, каким образом можно оценить динамические свойства человека-оператора при получении им сведений по информационному каналу, а в работе [5] определены предельные значения параметров динамических характеристик человека-оператора при управлении объектами различного типа. Некоторые результаты по исследованию влияния вибрации в системах “человек-машина” приведены в работе [6]. В работе [1] показано, что при выполнении человеком-оператором слежения по двум координатам за точечной целью и при воздействии на него случайной вибрации в диапазоне до

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. Все это свидетельствует о необходимости оценки 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 [1]. Тогда динамические свойства тела человека-оператора можно описать с помощью частотных характеристик:

- передаточной функции $G(j\omega)$ как отношения преобразования Фурье вынужденных колебаний точки наблюдения на 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. отношения 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 работе [2], только тестовый сигнал должен имитировать вибрационное воздействие.

Однако в настоящей работе мы воспользуемся материалами из работы [1] и покажем на конкретном примере, 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 приведена на рис. 1, где обозначено $x(t)$ – 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.

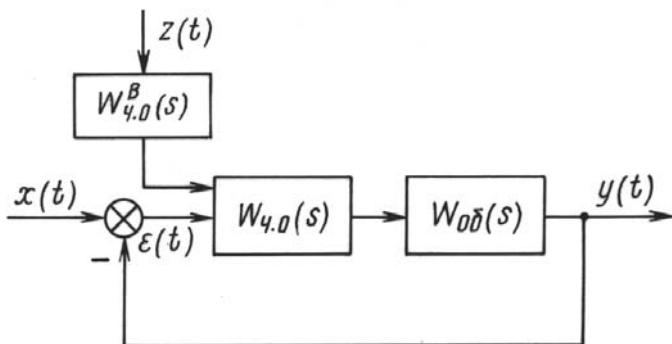


Рис. 1. Структурная схема системы “человек–машина” с учетом вибрации

Из работы [2] возьмем следующую функцию:

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

где s — символ преобразования Лапласа (при переходе в частотную область $s = j\omega$); $W_{\text{об}}(s) = K_{\text{ЛА}}/s$ — передаточная функция объекта управления (летательного аппарата ЛА). Эта передаточная функция приближенно отражает динамику самолета при управлении высотой; $W_{\text{ч.о.}}^B(s)$ — 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 $W_{\text{ч.о.}}^B$ влияет на выходной сигнал системы $y(t)$ — регулируемую величину.

Задача состоит в том, чтобы оценить дисперсию ошибки $\varepsilon(t) - \sigma_\varepsilon^2$ и дисперсию составляющей 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 примем схему, показанную на рис. 3.

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]].

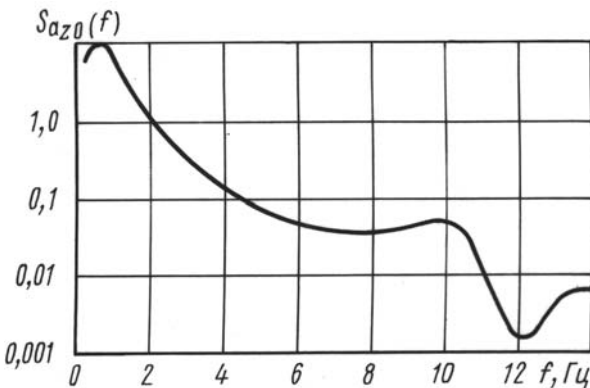


Рис. 2. Спектральная плотность вибраций на рабочем месте летчика на самолете F-4C



Рис. 3. Рабочая поза человека-оператора

На этом рисунке $A(f) = \frac{a_{z1}(f)}{a_{z0}(f)}$, где f — частота в герцах.

Далее для оценки влияния вибрации на эффективность работы человека-оператора используем экспериментальные данные, приведенные в работе [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

$$c_z^2 = 0,3 \frac{M^2}{c^3 \text{рад}} = S_z(\omega) \quad (2)$$

в полосе частот от 0 до $10 \cdot 2\pi$ рад/с, исходя из равенства дисперсий реального случайного и аппроксимированного процессов.

Частотную характеристику (см. рис. 4) также приближенно можно описать с помощью передаточной функции:

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

где $T_1 = \frac{1}{8\pi}$ с; $T_2 = \frac{1}{32\pi}$ с; $T_3 = \frac{1}{64\pi}$ с; $\xi_1 = 0,4$; $\xi_2 = 0,25$; $\xi_3 = 0,5$; $K_1 = 2,0$; $K_2 = 2,7$; $K_3 = 0,7$.

Это описание динамических свойств человека-оператора по отношению к вибрации выполнено приближенно с помощью трех колебательных звеньев с резонансными частотами 4, 16 и 32 рад/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

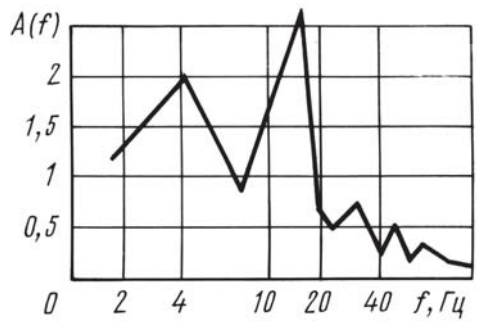


Рис. 4. Амплитудная частотная характеристика человека-оператора

$$\Phi_{\varepsilon}(s) = \frac{E(s)}{X(s)} = \frac{s(T_2^2 s^2 + 2\xi_2 T_2 + 1)}{T_2^2 s^3 + 2\xi_2 T_2 s^2 + s(1 + K_{\text{ЛA}} K_{\text{П}} e^{-s\tau} T_1) + K_{\text{ЛA}} K_{\text{П}} e^{-s\tau}}, \quad (5)$$

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

$$\Phi_{\varepsilon}(s) = \frac{Y(s)}{Z(s)} = \frac{W_{\text{ч.о}}^{\text{B}}(s) \cdot W_{\text{ч.о}}(s) W_{\text{об}}(s)}{1 + W_{\text{ч.о}}(s) W_{\text{об}}(s)} \quad (6)$$

или

$$\Phi_{\text{B}}(s) = \frac{K_{\text{П}} K_{\text{ЛA}} K_4 K_5 K_6}{[T_2^2 s^3 + 2\xi_2 T_2 s^2 + s(1 + K_{\text{ЛA}} K_{\text{П}} e^{-s\tau} T_1) + K_{\text{ЛA}} K_{\text{П}} e^{-s\tau}]} \times \frac{1}{(T_4^2 s^2 + 2\xi_4 T_4 s + 1)(T_5^2 s^2 + 2\xi_5 T_5 + 1)(T_6^2 s^2 + 2\xi_6 T_6 s + 1)}. \quad (7)$$

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

$$\sigma_{\varepsilon}^2 = \int_{-\infty}^{\infty} |\Phi_{\varepsilon}(j\omega)|^2 S_x(\omega) d\omega; \quad (8)$$

$$\sigma_y^2 = \int_{-\infty}^{\infty} |\Phi_{\text{B}}(j\omega)|^2 S_z(\omega) d\omega. \quad (9)$$

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

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

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

И, собственно, при значениях $T_1 = 0,2$; $T_2 = 0,2$; $\tau = 0,22$; $\xi_2 = 0,6$

и $K_{\Pi}K_{\text{ЛА}} = 1$ конкретные значения дисперсий σ_{ε}^2 и σ_y^2 будут равны

$$\sigma_{\varepsilon}^2 = 0,35c_x^2; \quad (12)$$

$$\sigma_y^2 = 0,5c_z^2.$$

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 бóльший вес, чем ошибка $\varepsilon(t)$ при слежении по информационному каналу.

Таким образом, в настоящей статье 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фролов К. В. Защита от вибрации и ударов: В 6 т. – М.: Машиностроение, 1995. – 456 с.
2. Poupkoff К. 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 // Cambrid/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. Сер. “Приборостроение”. – 2003. – № 4. – С. 95–103.
5. Ustyuzhanin A., Sheridan T., Pupkov K., McRuer P., Krendel E. “Limited Parameters of Dynamic Characteristics of a Human-Operator When Operating Objects of Different Types”, European Conference for Aerospace Sciences, Moscow, Russia, July 4, 2005.
6. Устюжанин А. Д. Исследование динамики систем “человек-машина” при воздействии вибрации. Интеллектуальные системы // Тр. Шестого международного симпозиума. – М.: Русаки, 2004. – С. 125–127.

Статья поступила в редакцию 19.09.2005

Константин Александрович Пупков родился в 1930 г., окончил в 1954 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана. Д-р техн. наук, зав. кафедрой “Системы автоматического управления” МГТУ им. Н.Э. Баумана, действительный член РАЕН. Автор более 200 научных работ в области теории автоматического управления.

K.A. Pupkov (b. 1930) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1954. D. Sc. (Eng.), professor, head of “Automatic Control Systems” department of the Bauman Moscow State Technical University, full member of Russian Academy of Natural Sciences. Author of over 200 publications in the field of theory of automatic control.

Александр Дмитриевич Устюжанин родился в 1983 г. Бакалавр техники и технологии. Студент 2-го курса магистратуры МГТУ им. Н.Э.Баумана. Автор 6 научных работ в области систем управления летательными аппаратами.

A.D. Ustyuzhanin (b. 1983). Student of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 6 publications in the field of control systems of flying vehicles.

Василий Дмитриевич Шашурин — д-р. техн. наук, профессор, зав. кафедрой “Технологии приборостроения” МГТУ им. Н.Э.Баумана. Специализируется в области нанотехнологии в приборостроении, надежности технологических систем.

V.D. Shashurin — D. Sc. (Eng.), professor of “Technologies of Instrumental Engineering” department of the Bauman Moscow State Technical University. Specializes in the field of nano-technology in instrumental engineering, probability of technological systems.

ИНФОРМАТИКА И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

УДК 004.27

П. Г. К л ю ч а р е в

ОСНОВЫ КВАНТОВЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ И КВАНТОВОЙ КРИПТОГРАФИИ

Рассмотрены основные идеи теории квантовых вычислений и квантовой криптографии, активно развиваемые в настоящее время. Рассмотрены наиболее важные квантовые алгоритмы: алгоритм поиска Гровера, алгоритм квантового преобразования Фурье, алгоритм нахождения периода функции и алгоритм факторизации натуральных чисел Шора. В обзоре также рассмотрен квантово-криптографический протокол передачи данных.

Большая часть литературы [1–12] предназначена для профессиональных физиков или профессиональных математиков. Избыток физической терминологии и использование сложных математических методов делает затруднительным понимание такой литературы программистами. Литература, понятная большинству программистов и в то же время достаточно полно отражающая основные идеи квантовых вычислений, практически отсутствует. Цель данного обзора состоит в том, чтобы восполнить этот пробел.

Не будем подробно рассматривать квантовую механику — заинтересованный читатель найдет подробное описание ее основ, например