

О ПРОБЛЕМЕ ВИБРОЗАЩИТЫ ЧЕЛОВЕКА-ОПЕРАТОРА *

К. В. Фролов

(Получено 12 января 1972)

Колебания в системах „человек-машина“ представляют одну из наименее изученных совершенно новых проблем, рожденных современной научно-технической революцией. Развитие техники создало новые „взаимоотношения“ между человеком и управляемой им машиной. В процессе работы человек, вступая в контакт с той или иной машиной, инструментом или системой управления, обычно испытывает на себе вибрационное воздействие. Поэтому возникает необходимость изучения колебаний в системах „человек-машина“, с целью создания научных основ для разработки эффективных средств и методов виброзащиты и обоснованных рекомендаций на допустимые нормы вибраций машин, а также оценки ошибок, предельных возможностей, адаптации, функционального и физиологического состояния оператора, выполняющего заданную программу. Кроме того, получение динамических характеристик оператора, подверженного вибрационному воздействию необходимо для создания математических моделей этих систем и проектирования систем управления, живым звеном которых является человек-оператор (с учетом реакций оператора на систему), а также для создания виброзащитных систем.

Следует подчеркнуть особую сложность проблемы изучения колебаний в системах человек-машина и построение динамических и математических моделей по следующим причинам: эта система строго говоря является нелинейной стохастической, нестационарной и с переменными во времени параметрами при сложной динамической структуре. Кроме того, при разработке методов виброзащиты и создании моделей необходимо учитывать степень утомляемости, эмоциональное и напряженное нервно-психическое состояние оператора. Существенный практический интерес здесь представляет установление возможностей формирования положительных эмоций, снимающих утомляемость и нервно-психическое напряжение.

Научной базой для исследования влияния на организм механических вибраций является биомеханика. Несмотря на свою глубокую историю от Леонардо-да Винчи до наших дней,**) биомеханика пока еще не стала наукой, представляющей собой упорядоченную систему наших знаний в области тонких изменений в живых организмах и систему широких

* Доложено на III международном конгрессе ИФТОММ в сентябре 1971 г.

***) Существенный вклад в развитие биомеханики внесли: Г. Галилей, В. Гарвет, Р. Декард, Р. Бойль, Р. Гук, Л. Эйлер, Т. Юнг, Г. Гельмгольц, В. Ван-дер-Поль и др., примечательно, что в области классической механики, именно этими учеными открыты фундаментальные законы.

обобщений. В этой связи изучение влияния механических колебаний на живые организмы требуют всесторонних и глубоких исследований и широких обобщений.

Наиболее характерными случаями вибрационного воздействия на оператора является: а) однокомпонентная вибрация, действующая в направлении вертикальной оси (z), когда оператор работает в положении сидя (рис. 1) и стоя (рис. 2).

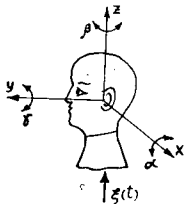


Рис. 1



Рис. 2



Рис. 3

б) Передача вибраций от инструмента через руки оператора (рис. 3).

Медицинскими исследованиями [1] установлено, что в первом случае длительное действие однонаправленной вертикальной вибрации $\xi(t)$ приводит к тяжелому вибрационному заболеванию и вызывает повреждение сосудов головного мозга и оболочек, нарушение циркуляции крови*), во втором случае вибрации вызывают повышенный приток импульсов в головной мозг, что отрицательно сказывается на высшей нервной деятельности и, естественно, вносит искажения в информацию, поступающую оператору по зрительным и другим каналам обратной связи [3].

Поэтому наибольший научный интерес представляет оценка уровня вибраций, передаваемых на голову оператора при заданном внешнем вибрационном воздействии в направлении оси z и создание моделей, определяющих уровень вибраций на голове оператора. Укажем, что создание математических и механических моделей тела человека-оператора, подверженного вибрационному воздействию не возможно без проведения тщательного эксперимента. Поэтому под математической моделью подразумевается аналитическое выражение экспериментально найденного механического передаточного импеданса $z_{12}(s) = \frac{F_1}{V_2}$ тела человека; под механической моделью понимается такая механическая система с сосредоточенными параметрами, передаточный импеданс которой совпадает с найденным импедансом тела человека. Задача синтеза модели формулируется как задача построения механической системы с заданными свойствами.

Исследование пространственных колебаний головы человека-оператора по координатам x, y, z (рис. 1) при заданном внешнем вибрационном воздействии $\xi(t)$ представляется актуальным в связи с изучением динамики полукружных каналов, являющихся датчиками вращательного движения [3] рис. 4 б и представляющими собой полости диаметром $d = 0,28$, напол-

*) Задача о течении крови по кровеносным сосудам при действии вибраций представляет отдельную проблему биомеханики [2].

ненные жидкостью, которая слегка перемещается относительно черепа каждый раз, когда череп поворачивается в пространстве. В каждом внутреннем ухе имеются по три полукружных канала, расположенных во взаимно-перпендикулярных плоскостях, что позволяет улавливать движение по всем трем возможным угловым направлениям.

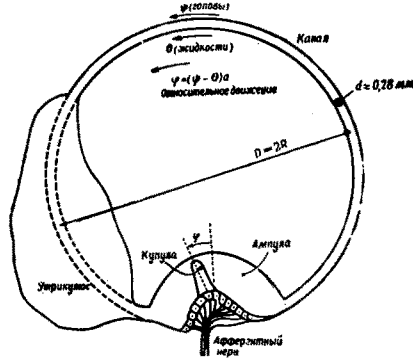


Рис. 4 а

Гидродинамика жидкости одного полукружного канала с учетом упругих свойств купулы (рис. 4) при заданном внешнем воздействии приближенно описывается уравнением вида [3]:

$$(1) \quad I \ddot{\varphi} + b \dot{\varphi} + k \varphi = (a I) \ddot{\alpha}$$

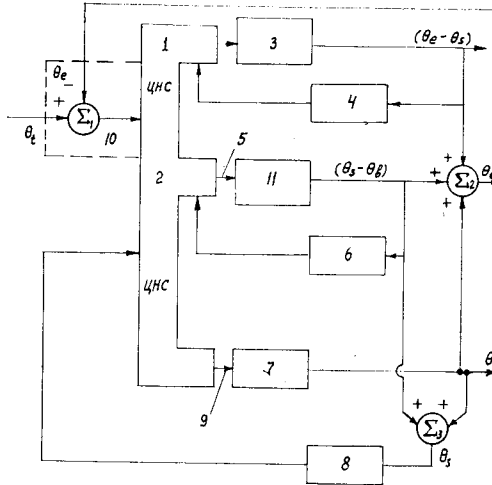
где I — момент инерции жидкости в тонкой трубке
 b — вращающий момент на единицу угловой скорости
 k — вращающий момент на единицу углового смещения
 α — абсолютное пространственное положение головы
 $\varphi = a(\psi - \theta)$ — угловое смещение купулы на единицу относительного углового смещения жидкости относительно черепа.

Из структуры уравнения (1) следует, что это уравнение описывает колебания жидкости в полукружном канале и поэтому данные о пространственных колебаниях головы при условии однонаправленных внешних вибрационных воздействий, позволяют оценить динамические реакции вестибулярного аппарата, а также выработать общие требования к критерию виброзащиты человека-оператора. Кроме того на основании этих данных можно уточнить существующие функциональные модели [3] (рис. 4 б) и построить новые динамические модели [4 ÷ 13]. Так, например, для построенных механических моделей, характеризующих динамическое состояние оператора, работающего в положении сидя и стоя необходимо иметь реальные спектры вибраций, действующих на оператора.

Введение реальных спектров в моделирующую машину позволяет получить необходимые данные по проектированию виброзащитных систем. При этом реальные амплитудно-частотные характеристики, полученные в условиях испытаний человека-оператора (см. рис. 5) должны быть скорректированы с данными моделирования.

Нашими исследованиями [4 ÷ 13], установлено: а) поза оператора существенно меняет амплитудно-частотные характеристики системы и поэтому динамические модели оператора, подверженного внешнему виб-

рациональному воздействию должны быть различными для различных поз. Нами предлагаются соответственно одномассовые, двухмассовые и трех-



Подпись к рисунку.

1.- глазодвигательные ядра, 2- центральная нервная система, 3-внешние мышцы, глаза и динамика глазного яблока, 4-проприоцепторы внешних мышц глаза, 5-мотонейроны мышц шеи, 6-проприоцепторы мышц шеи, 7-мышцы туловища и динамика движения туловища, 8-датчик сигнала обратной связи, подкружный канал, 9-мотонейрон (мышц туловища), 10-восприятие и первичная обработка сигнала "ошибки", 11-мышцы шеи, динамика движения головы относительно туловища.

Рис. 4 б

массовые динамические модели оператора для различных поз [5, 11], как наиболее полно отражающие экспериментально полученные амплитудно-частотные характеристики при случайном вибрационном воздействии.

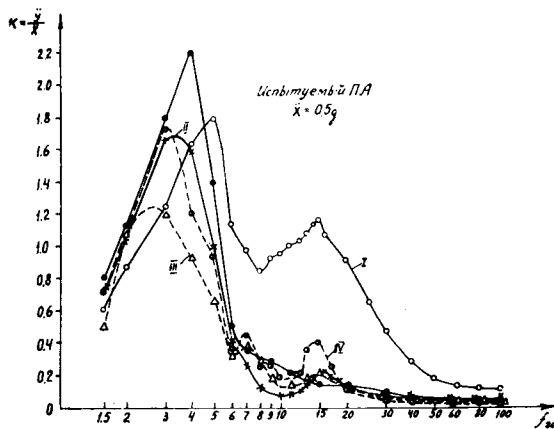


Рис. 5

Аналогичные амплитудно-частотные передаточные характеристики получены при испытании оператора в положении стоя (рис. 6) для различных поз. Здесь также как и для положения сидя построено отношение замеренного виброускорения на входе системы (на платформе вибростенда) к ускорению на выходе (по показаниям акселерометра, установленного на голове испытуемого).

Для структуры модели, полученной при исследовании воздействия стационарных случайных вибраций, импедансная передаточная функция в общем виде может быть записана следующим образом:

$$(2) \quad z_{12} + \frac{F_1}{V_2} = \frac{a_6 s^6 + a_5 s^5 + \dots + a_0}{b_3 s^3 + b_2 s^2 + b_1 s}$$

где a_i и b_i — коэффициенты, определяющие параметры модели.

Квадрат модуля этой функции можно представить в виде:

$$(3) \quad |z_{12}|^2 = \frac{c_6 p^6 + c_5 p^5 + \dots + c_0}{d_3 p^3 + d_2 p^2 + d_1 p}$$

где $p = S^2 = -W^2$; c_i ; d_i — новые константы, связанные со старыми известными соотношениями.

Коэффициенты a_i и b_i могут быть найдены, если составить систему линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных коэффициентов c_i и d_i .

$$(4) \quad \begin{aligned} \frac{c_6 p_1^6 + c_5 p_1^5 + \dots + c_0}{d_3 p_1^3 + d_2 p_1^2 + d_1 p_1} &= |z_{12}(p_1)|^2 \\ \dots & \\ \frac{c_6 p_N^6 + c_5 p_N^5 + \dots + c_0}{d_3 p_N^3 + d_2 p_N^2 + d_1 p_N} &= |z_{12}(p_N)|^2 \end{aligned}$$

которая может быть решена с помощью ЦВМ. Нами разработана методика для выбора узловых значений частот P_i , и функций $|z_{12}(p_i)|^2$ при которой выбранные значения узловых частот соответствуют характерным точкам заданной характеристики (максимумам, минимумам и т.д.), а общее число узловых частот равняется числу неизвестных коэффициентов. В этом случае система (4) всегда будет иметь решение.

Решив систему уравнений (4) и получив таким образом значения коэффициентов c_i и d_i , необходимо найти полюсы и нули функции z_{12} , т. е. комплексные корни числителя и знаменателя выражения (3). Выбрав те полюсы и нули, которые лежат в левой полуплоскости s , можно определить полиномы, составляющие числитель и знаменатель выражения (2), то есть найти константы a_i b_i . Такой метод нахождения функции по ее модулю известен как процедура Геверца.





№ поз	Схема позы	α
1		180°
2		135°
3		90°
4		45°

Рис. 6

Получив аналитическое выражение для импедансной характеристики тела человека, можно перейти к синтезу механической системы. Для этого следует выбрать один из многочисленных методов, приводящих к построению модели, обладающей заданной импедансной передаточной функцией. Одним из возможных методов синтеза модели с выбранной структурой является матричный метод. Применяя матричные тождества, можно получить выражения для механических импедансов и динамических подвижностей элементов цепной модели.

Полученная системе нелинейных уравнений может быть решена с помощью ЭЦВМ, например, методом скорейшего спуска (или иным образом). Решение этой задачи приводилось на БЭСМ-3М. В результате были получены следующие числовые значения параметров модели для позы 1 (см. работы [5,10])

$$\begin{array}{lll}
 m_1 = 0,5 & m_2 = 2,3 & m_3 = 4,2 \\
 k_1 = 22282 & k_2 = 16948 & k_3 = 5834 \\
 c_1 = 32,2 & c_2 = 165,2 & c_3 = 463,3 \\
 [m] = \frac{\text{кг} \cdot \text{сек}^2}{\text{м}} & [k] = \frac{\text{кг}}{\text{м}} & [c] = \frac{\text{кг} \cdot \text{сек}}{\text{м}}
 \end{array}$$

Сравнение параметров синтезированной модели с параметрами модели, найденной ранее, в случае рассмотрения передаточной функции человека по скорости показало, что значения жесткостей k_i в данном случае увеличились. Этот факт можно объяснить, предположив, что характеристики жесткостей модели являются нелинейными. В этом случае при больших амплитудах внешнего воздействия пружина работает на участке характеристики с большим значением жесткости и линейная трактовка задачи при уровнях вибраций, превышающих норму, как показывает наш эксперимент, становится не правомерной

Не всегда предположение о стационарности вибраций, действующих на человека, оправдано. Так, например, вибрации, создаваемые машинами виброударного действия, а также вибрации экипажей на транспорте являются нестационарными. В этом случае усреднять быстрые переходные процессы с большими амплитудами на сравнительно длинном отрезке времени было бы некорректно. Поэтому целесообразно рассматривать эти возмущения как ударные нагрузки.

При исследовании ударных воздействий на человека-оператора, его тело рассматривается как линейная система с сосредоточенными параметрами. Исследуются вертикальные колебания тела человека в положении сидя и стоя. В качестве характеристики, описывающей динамические свойства исследуемой системы, выбран передаточный механический импеданс, то есть отношение силы F_1 действующей на входе (основание, на котором сидит или стоит человек) к скорости V_2 на выходе системы (голове человека-оператора).

Для решения поставленной задачи необходимо экспериментально определить передаточные импедансы тела человека-оператора.

В результате эксперимента определяется импульсная возмущающаяся функция и переходные колебания тела человека. Зная спектральный состав реакции системы и спектр ударного возмущения, можно найти частотную характеристику исследуемой системы.

На основании проведенных экспериментов установлено, что изменение позы не только меняет частотные характеристики тела человека-оператора, но и в значительной степени изменяет демпфирующие способности исследуемой системы. Так на рис. 5 хорошо видно, что изменение позы испытуемого, подверженного случайной однонаправленной вибрации (по схеме рис. 6 существенно меняет не только спектральный состав вибраций на выходе системы, рис. 7, но и уровень выходного сигнала).

Кратко изложенные выше результаты позволяют спроектировать наиболее эффективные системы виброизоляции и выбрать параметры систем, обеспечивающие минимальные передачи вибрационных нагрузок на оператора. Кроме того по заданным характеристикам входного вибрационного сигнала имеется возможность вибрации на голове оператора и оценить тем самым „виброопасность“ того или иного объекта вибрационной техники.

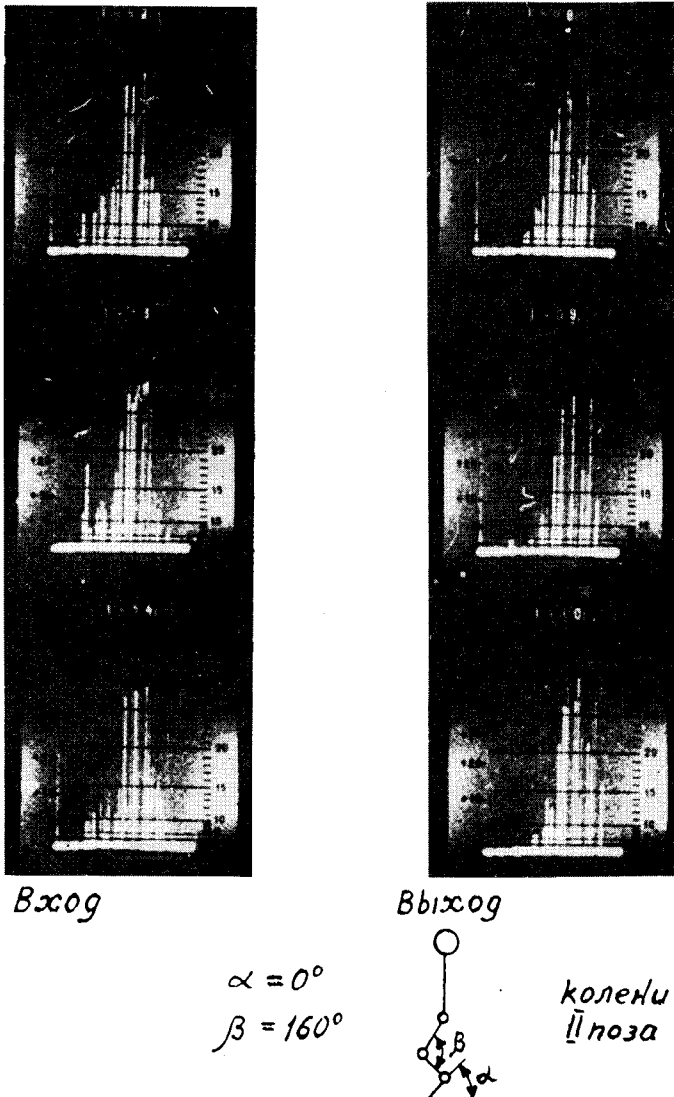


Рис. 7

Кроме того на основании полученных частотных характеристик тела человека-оператора, подверженного вибрациям, действующим через руки рис. 3, ноги рис. 2 или сидение рис. 1 имеется возможность обоснованно проектировать машины и механизмы с и выбирать их параметры с учетом свойств присоединенного к ним „живого звена“ [3].

Полученные динамические реакции человека на вибрационное гармоническое случайное стационарное и ударное воздействие позволяют уточнить данные медицинских исследований и сопоставить их с другими реакциями человеческого организма на вибрационное возмущение: например, показания сердечно-сосудистой системы (кардиограммы, давление крови), биотоки, электрическая проводимость, тонус мышц и др., а также определить информацию, необходимую для оценки работоспособности оператора в условиях длительного и кратковременного действия вибраций различного спектрального состава и интенсивности.

В заключение отметим, что настоящий доклад посвящен обзору основных результатов, полученных нами и изложенных более подробно в отдельных публикациях [4, 13]. Однако мы надеемся, что несмотря на краткость изложения нам удалось показать возможности применения наших исследований к построению моделей систем „человек-машина“.

ЛИТЕРАТУРА:

- [1] Е. Ц. Андреева-Галанина, Э. А. Дрогичина, В. Г. Артамонова, *Вибрационная болезнь*, Л., Медгиз, 1961.
- [2] Фын Ян Чен, *Биомеханика, ее предмет и история некоторые проблемы применения механики сплошной среды в физиологии*. Механика, изд. „Мир“, № 6, (112), 1968.
- [3] Дж. Милсум *Анализ биологических систем управления*. Изд. „Мир“, М, 14, 1968.
- [4] Б. А. Потемкин, К. В. Фролов, *Идентификация модели „человек-оператор“ при случайном вибрационном воздействии*. В сб. Новые методы исследования шумов и вибраций и кибернетическая диагностика машин и механизмов, г. Каунас, 1970.
- [5] Б. А. Потемкин, К. В. Фролов, *О модельных представлениях биомеханической системы „человек-оператор“ при случайном вибрационном воздействии*. Доклады Академии наук, т. 197, № 2, 1971.
- [6] К. В. Фролов, Б. А. Потемкин, *Определение параметров модели тела человека-оператора, подверженного ударному воздействию*. В сб. Динамика и долговечность машин, Изд. Томского Государственного университета, г. Томск, 1970.
- [7] К. В. Фролов, *Определение импедансных характеристик тела человека-оператора при ударном воздействии*. В сб. Динамика и долговечность машин, г. Томск, 1970.
- [8] К. В. Фролов, *Определение импедансных характеристик тела человека-оператора при ударном воздействии*. В сб. Динамика и долговечность машин. г. Томск, 1970.
- [9] K. V. Frolov, *Experimental Methods of Investigations of the Response of Human Operator Considered as a Nonlinear Oscillatory System under Harmonic and Random Vibration Excitation*, V International Conference on Nonlinear Volume V, Kiev — 1969.
- [10] K. V. Frolov, *Dependance of Position of the Dynamic Characteristics of a Human Operator Subjected to Vibration*. Dynamic Response of Biomechanical Systems ASME, New York 1970.
- [11] К. В. Фролов, *Динамические реакции тела человека при гармоническом и случайном вибрационном воздействии*. X Югословенски конгресс рационалне и примењене механике, Башко Поље, 1. до 6. јуна 1970.
- [12] Б. А. Потемкин, К. В. Фролов, *О модельных представлениях биомеханической системы „человек-оператор“ при случайном вибрационном воздействии*. Доклады Академии наук, том 197, № 2, 1971.
- [13] А. С. Григанов, К. В. Фролов, *Проблемы оценки влияния вибраций машин и инструмента на организм человека-оператора*. В сб. Колебания машин, „Наука“, 1968.

(Институт машиноведения, Москва, СССР)