

НЕКОТОРЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ СИСТЕМЫ «ЧЕЛОВЕК – МАШИНА – ОБРАБАТЫВАЕМАЯ СРЕДА»

У статті викладені деякі напрямки дослідження системи «людина – машина – оброблюване середовище». Людина-оператор розглядається з погляду біомеханіки.

SOME DIRECTIONS OF EXAMINATIONS OF SYSTEM «THE PERSON - THE MACHINE - THE TREATED ENVIRONMENT»

In a paper some directions of examination of system «the person – the machine – the treated environment» are stated. The human controller is considered from the point of view of a biomechanics.

С развитием техники возникли новые условия взаимодействия человека и машины. В процессе работы человек, управляющий техническими системами и комплексами, обычно испытывает на себе вибрационное воздействие. Вместе с тем динамические характеристики человека-оператора могут существенно влиять на рабочие процессы машины. Поэтому возникает необходимость изучения колебаний в системах «человек-машина» для создания научных основ разработки эффективных средств и методов виброзащиты. При этом следует сформулировать обоснованные критерии нормирования допустимых уровней вибраций машины, оценки функционального и физиологического состояния оператора, выполняющего заданную программу, его способность адаптации к вибрационному воздействию. Кроме того, определение динамических характеристик оператора при действии вибраций необходимо для создания математических моделей систем «человек-машина» и проектирования систем управления, звеном которых является человек-оператор.

Научной базой для исследования влияния механических колебаний на человека является биомеханика. С изучением механических колебаний в живых организмах связан обширный круг глубоких биомеханических исследований и обобщений [1].

Как у нас в стране, так и за рубежом ведутся интенсивные исследования биомеханических характеристик, передачи вибрации, её распространения по телу человека, вызываемых ею механических эффектов и рефлекторных ответов, приводящих к утомлению.

Общее действие вибраций на человека может осуществляться через колебания пола, фундамента для машин, сидения и т.д. Вибрации действуют на все клетки и ткани организма, причём их вредное действие ухудшается при напряжённом положении тела, сжатии рычагов управления, утомлении, особенно в сочетании с факторами внешней среды (шум, метеорологические условия, запылённость и т.п.). Длительно действующие вибрации вызывают поражение центральной нервной и сердечнососудистой систем, опорно-двигательного аппарата, слухового и вестибулярного анализаторов, изменения функции эндокринной системы и могут привести, в конечном счёте, к развитию профессионального заболевания со стойким снижением трудоспособности – вибрационной болезни [2]. У шахтёров виброопасных профессий вибрационная болезнь развивается при стаже 6,5 и 11,3 лет [3]. Вибрационная болезнь развивается быстрее у шахтёров, начавших работать виброинструментом в более позднем возрасте. Причём, у начавших работать после 30 лет, срок развития заболевания сокращается почти вдвое (до

$6,8 \pm 2,9$) [3]. Под воздействием вибрации наряду с другими функциями организма изменяется также морфологический состав крови.

Сочетанное действие вибрации с основной частотой 63 и 500 Гц и шумом с максимумом акустической энергии на среднегеометрических частотах 4000 и 500 Гц с нормативными уровнями вызывает стойкое изменение функционального состояния церебральной гемодинамики, протекающее по типу снижения кровоснабжения головного мозга и ослабления сократительной активности сосудов [4].

У некоторых рабочих шумовибрационных профессий при стаже работы до 5 лет отмечалось умеренное снижение восприятия звука на высоких частотах. При трудовом стаже 5 лет и более у большинства рабочих выявлена профессиональная тугоухость [2]. При значительном снижении слуховой чувствительности страдает и речевая аудиометрия. В ряде случаев кривая разборчивости речи не достигает 100 % даже при максимальной интенсивности речи, а составляет 90-80 %, а иногда и менее [2].

При удвоении силы нажима происходит усиление проводимости для частоты 8 Гц на 1,2 дБ, для частоты 16 Гц – на 3 дБ, для частот 32-125 Гц – на 4-5 дБ [5].

Вибрация 16 Гц вызывает повышение температуры кожи, увеличение величины осцилляции, усиление кровотока. Вибрация сложной формы вызывает снижение температуры кожи, указывающее на тенденцию к спазмам сосудов [5, 6].

Таким образом, рабочие процессы горных машин, их вибрации, шум оказывают вредное влияние на человека и проявляются в утомляемости, ухудшении трудоспособности, изменении нервных и метаболических процессов, частичной или полной потери слуха, вибрационной болезни. Вместе с тем, биомеханические характеристики человека-оператора могут существенно влиять на рабочие процессы машины.

Исследования биодинамических характеристик тела человека ведутся по изучению связанных колебаний тела человека, определению упруго-вязких свойств.

Работа Х. Гирке [7] является обзорной по исследованиям биодинамических характеристик тела человека при вибрационных воздействиях.

Динамические характеристики тела человека, его упругость, вязкость зависят от роста, возраста, стажа испытуемых, внешних нагрузок [8, 9].

Установление основных закономерностей распространения низкочастотных вибраций по телу человека являлась целью работы [8]. Установлены резонансные частоты передаточной функции при колебаниях человека. Так, при вертикальных колебаниях резонансная частота передаточной функции – 3-4 Гц, при продольных колебаниях наблюдались два резонанса 1,25 и 2,5 Гц, при поперечных колебаниях резонансная частота составляет 0,8 Гц. В поперечном направлении тело человека наиболее чувствительно к колебаниям с частотой 0,6-2 Гц. В диапазоне частот 1-10 Гц выявлены определённые закономерности изменения передаточной функции тела сидящего человека и фазовой характеристики.

Исследованию свободных колебаний тела человека, располагающегося в горизонтальном положении на платформе посвящена работа [9]. Оказалось, что параметры, оценивающие упруго-вязкость тела, являются хорошо воспроизводимыми и стабильными, если тело не подвергается активным расслабляющим манипуляциям или интенсивным перегрузкам.

При вертикальных вибрациях сидения с помощью специальных экспериментов была обнаружена нестационарность динамических характеристик тела человека [10]. Показано, что при горизонтальных колебаниях, как и при вертикаль-

ных, характеристики связей костно-мышечной структуры позвоночного столба имеют нестационарный характер.

Некоторые общие свойства амплитудно-частотных характеристик сложных линейных и нелинейных систем, рассмотренные в работе [11], возможно использовать при построении динамической модели тела человека-оператора.

Реакция тела человека на нестационарное случайное воздействие исследована в работе [12]. Тело человека рассмотрено как нелинейная динамическая система с сосредоточенными массами, упругими элементами и демпферами вязкого трения. Предполагалось, что человек находится на линейной механической системе с одним входом. Рассмотрена динамическая система «человек – механическая система». Исследование проведено в рамках теории марковских случайных процессов.

Экспериментальному исследованию динамических характеристик бедренной кости человека посвящена работа [13]. Изложена методика, позволяющая определить амплитудно-частотные характеристики сухой бедренной кости человека. Установлен диапазон частот (до 10^3 Гц) и уровень ускорений (до 0,14), в котором бедренную кость можно считать линейной системой с конечным числом степеней свободы.

Большой объём исследований по изучению характеристик человека – оператора, модели тела человека выполнен под руководством Фролова К.В.

К.В. Фроловым и Б.А. Потёмкиным были проведены исследования [14-16] амплитудно-частотных характеристик, полученных экспериментально в условиях действия вибрационного возбуждения. Установлено, что поза оператора существенно меняет амплитудно-частотные характеристики системы, и поэтому динамические модели оператора, подверженного внешнему вибрационному воздействию, должны быть различными для различных поз. Авторами предлагаются соответственно одномассные, двумассные и трёхмассные динамические модели оператора для различных поз, как наиболее полно отражающие экспериментально полученные амплитудно-частотные характеристики при случайном вибрационном воздействии.

В работе [17] замечено, что функционирование человека-оператора, как звена управления, нарушается в условиях механических вибраций. Наблюдаются функциональные нарушения вестибулярного происхождения, снижающие качество и надёжность системы человек-машина.

Вибрации, создаваемые машинами виброударного действия, и вибрации экипажей на транспорте, являются нестационарными. При исследовании ударных воздействий на человека-оператора, его тело рассматривается автором как линейная система с сосредоточенными параметрами. Установлено, что изменение позы не только меняет частотные характеристики тела человека, но и изменяет способности исследуемой системы. При действии на человека-оператора механических колебаний с амплитудой более 0,3 мм необходимо использовать методы нелинейной механики. Модели описываются уравнениями Дуффинга с мягкими нелинейностями упругих восстанавливающих сил. Основные зависимости, характеризующие нелинейные связи: амплитудно-частотные, зависимость фазы колебательного процесса от уровня и частоты возбуждения. До уровня 0,6 мм заметного сдвига резонансной частоты не наблюдается, то есть при низких уровнях система может рассматриваться в рамках линейной теории. Уменьшение резонансных частот показало, что нелинейная характеристика, определяющая жесткостные свойства тела человека, является «мягкой».

Выявлена К.В. Фроловым важная особенность исследуемой биомеханической системы – способность существенно изменять собственную частоту (в одном случае в сторону её уменьшения, когда основной спектр частот воздействия находится в резонансной зоне, в противном случае – в сторону увеличения). Изменение частоты во времени не является линейным.

Выявлено существенное влияние продолжительности воздействия вибраций на динамические свойства тела человека. В количественном отношении проявления свойств, определяемых нелинейными факторами и временем действия вибраций, равноценны.

Автор утверждает, что при практическом анализе подобных биомеханических систем пренебрежение перечисленными факторами нецелесообразно и может приводить к ошибкам, носящим принципиальный характер.

Работа Б.А. Потёмкина и К.В. Фролова [16] посвящена экспериментальному определению динамических характеристик тела человека при действии случайных вибраций в зависимости от изменения его позы с целью изучения свойств системы «оператор-машина» и построения механических моделей тела человека-оператора. Авторами рассмотрены колебания тела сидящего человека с учётом переменности параметров во времени и их зависимости от степени напряжения мышц, положения позвоночника в пространстве.

При исследовании использован метод определения передаточных функций системы. Передаточные функции модели определялись на основании основных соотношений статистической динамики линейных систем. В результате обработки экспериментальных данных получены квадраты модулей передаточных функций. Полученные кривые носят ярко выраженный резонансный характер. Тело человека авторами сравнивается с фильтром колебаний низких частот, так как имеет место быстрое убывание передаточных функций при возрастании частоты возбуждения. Установлено, что в зависимости от позы динамические характеристики тела существенно меняются. При этом изменяются не только значения собственных частот, но и полюсы пропускания от 42 Гц до 12 Гц.

Математические модели тела человека найдены в результате аналитической аппроксимации экспериментальных частотных характеристик и применения метода Геверца. Эти модели представляют дробно-рациональные функции частоты, устанавливающие связь между процессами на входе и выходе исследуемой системы

$$G(j\omega) = \sum_{i=0}^n B_i \omega^i / \sum_{i=0}^m A_i \omega^i.$$

Для синтеза механических моделей использовалось представление механической системы в виде четырёхполюсника. Синтез механических моделей проводился с помощью матричного метода. Передаточные функции исследуемой си-

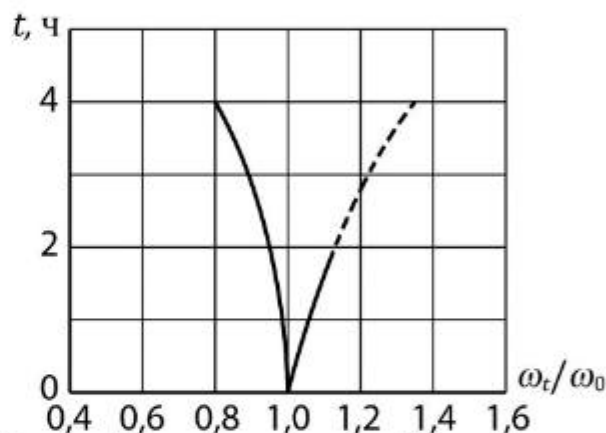


Рис. 1 – Изменение резонансной частоты тела человека-оператора под воздействием гармонических вибраций

стемы были выражены через механические импедансы и динамические податливости отдельных её элементов.

Найденные параметры моделей тела человека представлены на рис. 2.

	а			б	в	
	1	2	3	1	1	2
m , кгс ² /м	0,5	2,3	4,2	1	0,5	6,5
k , 10 ³ кг/м	18,9	9,59	4,66	11,5	11,8	45,4
c , кгс/м	12	98	1230	523	420	928

В работе [13] система «человек-машина» при действии вибраций представлена в виде блок-схемы (см. рис. 3). Кроме обычных «информационных» сигналов $p(t)$, $\ell(t)$, $c(t)$, широкими стрелками изображены механические связи, осуществляемые между человеком и машиной. Функция $m(t)$, определяет воздействие человека-оператора на органы управления машины, а $u(r, t)$ описывает характеристики вибраций машины, действующих на человека.

Реакции человека оператора на вибрации $u(r, t)$, порождённые заданным распределением в пространстве источников колебаний, можно условно представить с помощью упрощённой блок-схемы, изображённой на рис. 4. Выделены следующие звенья: механическая система, включающая в себя опорно-двигательный аппарат человека 2 и его внутренние органы 1; группа рецепторов А, Б, В, преобразующая механические колебания в электрические импульсы нейронных сетей, и центральная нервная система (ЦНС), осуществляющая регуляцию процессов в организме.

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

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

где a_i и b_i – коэффициенты, определяющие параметры модели.

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

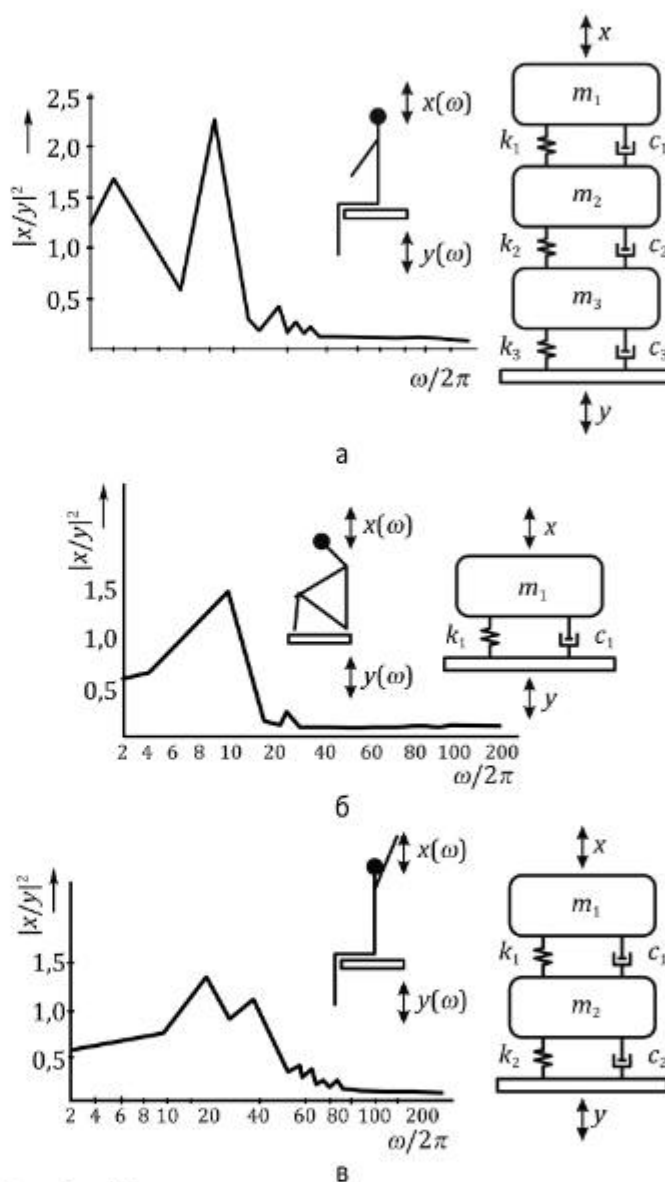


Рис. 2 – Частотные характеристики тела человека и механические модели для разных поз

$$\sum_{n=0}^6 c_n p_i^n / \sum_{n=1}^3 d_n p_i^n = |Z_{12}(p_i)|^2,$$

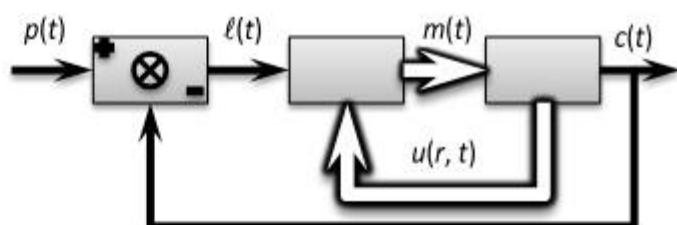
которая может быть решена с помощью ЭВМ. Авторами разработана методика для выбора узловых значений частот p_i и функций $z(p_i)$, при которой выбранные значения узловых частот соответствуют характерным точкам заданной характеристики.

Метод нахождения функции по её модулю известен как процедура Геверца. Получив аналитическое выражение для импедансной характеристики тела человека, авторы перешли к синтезу механической системы. Сравнение параметров синтезированной модели с параметрами модели, найденной ранее при рассмотрении передаточной функции человека по скорости, показало, что значения жёсткостей в данном случае увеличились. Линейная трактовка задачи при уровнях вибраций, превышающих норму, как показывает эксперимент, является некорректной.

Исследования, проведённые Г.Я. Пановко и Б.Г. Трактовенко [18] показали, что при модельном представлении тела человека в виде некоторой колебательной системы (в общем случае являющейся нелинейной нестационарной системой с бесконечным числом степеней свободы) следует учитывать число существенных степеней свободы, резонансные состояния, влияния нелинейностей на основные динамические свойства тела человека. В отличие от других существующих моделей в данной модели учтены не только одномерные вертикальные, но также угловые и горизонтальные колебания тела человека в сагиттальной плоскости.

Анализ полученных экспериментальных амплитудно-частотных характеристик позволил авторам заключить, что угловые и горизонтальные колебания тела человека, даже при возбуждении его в вертикальном направлении не менее существенны, чем вертикальные колебания, которые принимались за основные при моделировании тела человека.

Авторами установлено, что тело человека обладает тремя существенными степенями свободы, которые проявляются во всех измерениях амплитудно-частотных характеристик, подтверждено наличие мягкой нелинейности тела человека.



1 – визуальное устройство; 2 – человек-оператор; 3 – управляемый объект (машина)

Рис. 3 – Блок-схема системы «человек-машина»

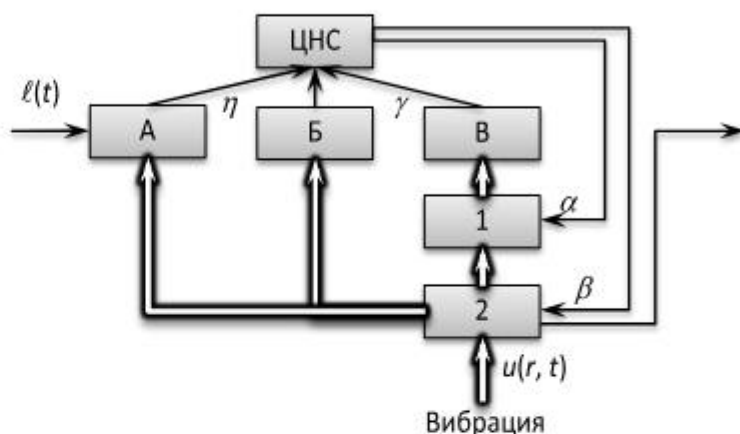


Рис. 4 – Блок-схема, А, Б, В – рецепторы

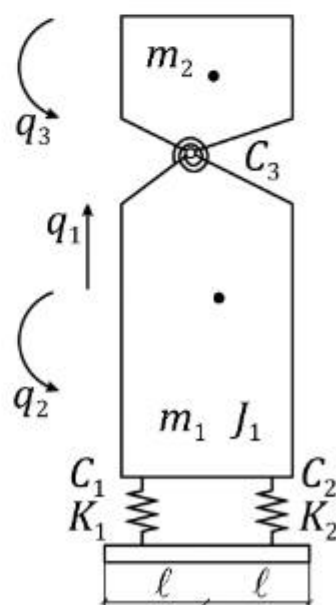


Рис. 5 – Модель тела человека

В качестве модели Г.Я. Пановко и Я.Г. Трактотенко предлагают колебательную систему с тремя степенями свободы (см. рис. 5), причём в этой модели угловые колебания головы человека имитируются угловыми колебаниями верхней массы относительно упругого шарнира, а плоские колебания туловища имитируются плоскими колебаниями нижней массы: центр тяжести этой массы движется по вертикали, и, кроме того, сама масса совершает поворот вокруг поперечной оси z .

Неизвестные значения упругих и демпфирующих коэффициентов находятся авторами по данным сопоставления экспериментальных и теоретических амплитудно-частотных характеристик. Каждому фиксированному уровню возбуждения соответствует своя линеаризованная модель тела человека. Дифференциальные уравнения движения такой модели получены в виде

$$\begin{aligned} (m_1 + m_2)\ddot{q}_1 + m_2 r_1 \ddot{q}_2 \cos \alpha + m_2 r_1 \ddot{q}_3 \cos \beta + k_1(\dot{q}_1 - \dot{q}_0 - \dot{q}_2 l) + \\ + k_2(\dot{q}_1 - \dot{q}_0 - \dot{q}_2 l) + c_1(q_1 - q_0 - q_2 l) + c_2(q_1 - q_0 - q_2 l) = 0; \\ m_2 r_1 \ddot{q}_1 \cos \alpha + (I_1 + m_2 r_1^2)\ddot{q}_2 + m_2 r_1 r_2 \ddot{q}_3 \cos(\alpha - \beta) - k_1 l(\dot{q}_1 - \dot{q}_0 - \dot{q}_2 l) + \\ + k_2 l(\dot{q}_1 - \dot{q}_0 - \dot{q}_2 l) - k_3(\dot{q}_3 - \dot{q}_2) - c_1 l(q_1 - q_0 - q_2 l) + c_2 l(q_1 - q_0 - q_2 l) - c_3(q_3 - q_2) = 0; \\ m_2 r_2 \ddot{q}_1 \cos \beta + m_2 r_1 r_2 \ddot{q}_2 \cos(\alpha - \beta) + (I_2 + m_2 r_2^2)\ddot{q}_3 + k_3(\dot{q}_3 - \dot{q}_2) + c_3(q_3 - q_2) = 0. \end{aligned}$$

В результате решения данной системы относительно обобщённых координат q_1, q_2, q_3 получены аналитические выражения, описывающие амплитудно-частотные характеристики модели, соответствующие экспериментальным амплитудно-частотным характеристикам тела человека.

В работе [19] тело человека рассматривается как линейная механическая система с сосредоточенными массами m_i пружинами k_i и демпферами c_i . При этом учитывается, что параметры системы могут меняться во времени и существенно зависят от степени напряжения мышц и позы человека. В качестве входного сигнала принималось виброускорение платформы, на которой сидел человек, в качестве выходного – ускорение его головы. Целью являлось определение частотных характеристик тела человека.

Полученные экспериментально амплитудно-частотные характеристики тела человека в трёх различных позах при действии широкополосных случайных вибраций позволили перейти к синтезу динамических моделей. Исследуемая система была представлена в виде четырёхполюсника.

Модели, построенные для трёх поз системы «таз-голова» изображены на рис. 6. Они имеют передаточные функции, эквивалентные передаточным функциям «таз-голова». Полученные модели позволяют предсказывать сте-

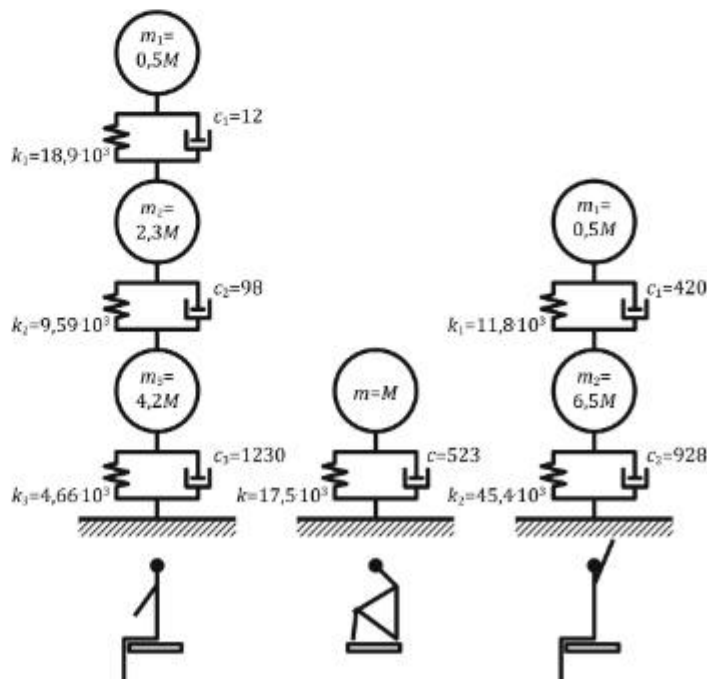


Рис. 6 – Модели системы

пень передачи вибраций на голову сидящего человека.

Получив аналитическое выражение для передаточной функции, можно перейти к синтезу механической модели. Применён матричный метод синтеза.

Я.И. Грдина рассматривает живой организм [20] как механическую систему и материальных точек, движение которой сдерживается μ связями. Используя известные методы аналитической механики, Я.И. Грдина в своих работах выводит динамические уравнения живых организмов в разной форме: уравнения Лагранжа I и II рода, уравнения Аппеля, канонические уравнения.

Уравнения связей имеют вид

$$\sum_i A_{si}(t, x_k, a_{si}) dx_i + \sum_g H_{sg}(x_k, a_{si}) da_{sg} + B_s(t, x_k) dt = 0, \quad (1)$$

где x_i – декартовы координаты точек живого организма;

a_{si} – свободные параметры свободных связей;

A_{si}, H_{sg}, B_s – коэффициенты.

Независимые уравнения свободных связей в вариациях получены в виде

$$\delta F_s = 0; \delta dF_s = 0; \delta d^2 F_s = 0, \dots, \delta d^{\omega-1} F_s = 0. \quad (2)$$

Уравнения Лагранжа 1 рода

$$m_i \ddot{x}_i = X + \sum \lambda_s A_{si}. \quad (3)$$

Добавляя к уравнениям (3) уравнения связей (1) и уравнения вида (2), получена система $3n + \mu + s$ уравнений для определения величин x_i, λ_s, a_s в функции от t и a_p .

Уравнения Лагранжа II рода

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_r} - \frac{\partial T}{\partial q_r} = Q_r + \sum_m \lambda_m P_{mr}; \quad \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{a}_\varepsilon} - \frac{\partial T}{\partial a_\varepsilon} = E_\varepsilon + \sum \lambda_\varepsilon N_{\varepsilon\varepsilon};$$

где
$$Q_r = \sum X_i \frac{\partial x_i}{\partial q_r}; \quad E_\varepsilon = \sum X_i \frac{\partial x_i}{\partial a_\varepsilon}$$

соответственно обобщённые силы и параметры силы живого организма.

Уравнения Аппеля

$$\frac{\partial S}{\partial \ddot{q}_r} = Q_r + \sum_m \lambda_m P_{mr}; \quad \frac{\partial S}{\partial \ddot{a}_\varepsilon} = E_\varepsilon + \sum \lambda_\varepsilon P_{\varepsilon\varepsilon}.$$

Канонические уравнения

$$\dot{q}_r = \frac{\partial \Phi}{\partial p_r};$$

Здесь

$$p_r = \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_r}; \quad X_\varepsilon = \frac{\partial T}{\partial a_\varepsilon}; \quad \Phi = \sum_r p_r \dot{q}_r + \sum_\varepsilon X_\varepsilon \dot{a}_\varepsilon - T.$$

К этим уравнениям добавляются уравнения связей в канонических переменных

$$\sum_r K_{mr} p_r + \sum M_{m\varepsilon} X_\varepsilon + K_m = 0,$$

Здесь $K_{mr}, M_{m\varepsilon}, K_m$ – некоторые функции от t, q_r, a_ε .

Положение и скорости точек живого организма в каждый момент времени зависит лишь от всей совокупности значений независимых параметров, начиная с

некоторого момента времени, и от положения и состояния живого организма в этот начальный момент.

В настоящее время в промышленности широко используются средства автоматизации производственных процессов – промышленных роботов – как технологически универсальных автоматических манипуляторов, функциональные системы которых обеспечивают моделирование двигательных, управляющих и приспособительных функций человека, реализуемых при выполнении трудовых операций. Это позволяет исключить человека из зон с повышенной вибрацией и шумом, при этом реализуя все его возможности по выполнению технологических операций и управлению. Обобщённая структурная схема промышленного робота представлена на рис. 7.

По сложности и совершенству информационно-логической структуры промышленные роботы разделяются на 3 основных типа: жёсткопрограммируемые, адаптивные и высокоорганизованные.

Для оценки технологических качеств промышленных роботов необходима система комплексных характеристик, в которую должны входить технологическая универсальность, функциональная надёжность, переналаживаемость, быстродействие, эффективная мощность.

Выводы

1. Задача исследования системы «человек-машина-обрабатываемая среда» является чрезвычайно важной для целей рационального проектирования, конструирования приборов, машин, устройств управления, средств защиты.

2. Человек, машина и обрабатываемая среда находятся в постоянной, сложной взаимосвязи, поэтому необходимо изучение отдельных элементов этой системы. С одной стороны вибрации, вызываемые машиной и обрабатываемой средой и передаваемые на человека-оператора, как управляющего звена, требуют создания научных основ средств виброзащиты. С другой стороны нормальная работа звеньев, управляемых человеком-оператором, требуют изучения биодинамических характеристик последнего.

3. Для улучшения связи человека с машиной как за счёт рационализации человеческих качеств, так и за счёт биологизации самой машины необходимо изучать математические модели человека. Модели представляются с позиций: теории управления как некоторые передаточные функции; динамики движения как система сложных дифференциальных уравнений.

4. Человек (во многих случаях) является слабым динамическим звеном в системе, поэтому исключение человека при выполнении опасных технологических операций, замена в сложных процессах управления производством требуют изучения возможностей применения искусственных механизмов-роботов.

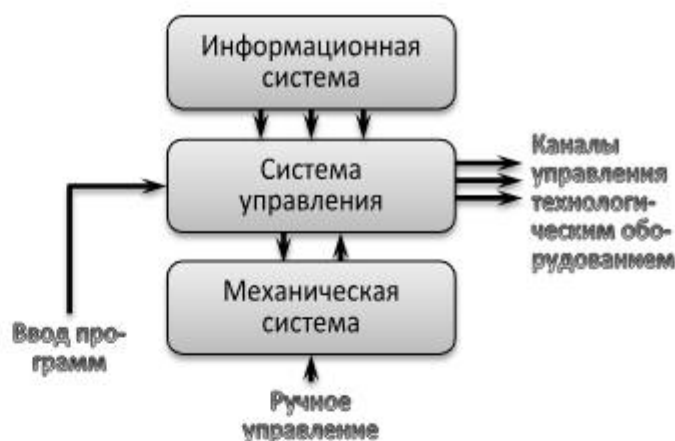


Рис. 7 – Структурная схема промышленного робота

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фын Ян-чен. Биомеханика, её предмет, история и некоторые проблемы применения механики сплошной среды в физиологии // Механика. – М.: Мир, 1968. – № 6 (112). – С. 104-137.
2. Лебедева А.Ф., Тарасова А.В., Суворов Г.А. Функциональное состояние организма при действии общей вибрации и шума // Влияние вибрации на организм человека и проблемы виброзащиты. Тезисы докладов.

- Москва-Левково, 4 февраля 1974 г. – М.: Наука, 1974. – С. 270-277.
3. Никольский В.Н. Некоторые аспекты профилактики вибрационной болезни // Влияние вибраций на организм человека и проблемы виброзащиты. Тезисы докладов. Москва-Левково, 4 февраля 1974 г. – М.: Наука, 1974. – С. 258-261.
 4. Троценко А.Н., Изменение мозговой гемодинамики при комбинированном действии вибрации и шума различных спектров // Влияние вибраций на организм человека и проблемы виброзащиты. Тезисы докладов. Москва-Левково, 4 февраля 1974 г. – М.: Наука, 1974. – С. 343-345.
 5. Исследование влияния вибраций машин и инструмента на руки человека-оператора при варьировании начальных усилий / Бутковская З.М. и др. // Виброизоляция машин и виброзащита человека-оператора. – С. 5-16.
 6. Андреева-Галанина Я.Ц. Вибрация и её значение в гигиене труда. – Л., 1956.
 7. Gierke H.E. Biodynamic models and their application // The Journal of the Acoustical Society of America. – 1970. – Vol. 50, № 6. – P. 1397-1413.
 8. Динамические характеристики тела человека – оператора мобильных машин / Гидон В.Д. и др. // Влияние вибраций на организм человека и проблемы виброзащиты. Тезисы докладов. Москва-Левково, 4 февраля 1974 г. – М.: Наука, 1974. – С. 30-37.
 9. Лившиц И.Б. Исследование упруго-вязких свойств тела человека // Влияние вибраций на организм человека и проблемы виброзащиты. Тезисы докладов. Москва-Левково, 4 февраля 1974 г. – М.: Наука, 1974. – С. 42-48.
 10. О нестационарности динамических характеристик тела человека при горизонтальных колебаниях / Потёмкин Б.А. и др. // Влияние вибраций на организм человека и проблемы виброзащиты. Москва-Левково, 4 февраля 1974 г. – М.: Наука, 1974. – С. 25-29.
 11. Банах Л.Я., Перминов М.Д. Некоторые свойства амплитудно-фазо-частотных характеристик и возможность их использования для идентификации динамической модели тела человека-оператора // Влияние вибраций на организм человека и проблемы виброзащиты. Тезисы докладов. Москва-Левково, 4 февраля 1974 г. – М.: Наука, 1974. – С. 64-72.
 12. Голосковов Е.Г. Исиков Н.Е. Исследование колебаний тела человека при нестационарных случайных вибрациях // Влияние вибраций на организм человека и проблемы виброзащиты. Тезисы докладов. Москва-Левково, 4 февраля 1974 г. – М.: Наука, 1974. – С. 49-54.
 13. Бутряков В.И., Потёмкин Б.А., Сафаршвили Г.Д. О методике экспериментального исследования динамических характеристик бедренной кости человека // Влияние вибраций на организм человека и проблемы виброзащиты. Тезисы докладов. Москва-Левково, 4 февраля 1974 г. – М.: Наука, 1974. – С. 97-99.
 14. Фролов Л.В., Потёмкин Б.Д. Определение параметров модели тела «человека-оператора», подверженного ударному воздействию // Динамика и долговечность машин. – Изд-во Томского гос. ун-та, 1970.
 15. Потёмкин Б.Д., Фролов К.В. Определение импедансных характеристик тела человека оператора при ударном воздействии. В сб.: «Динамика и долговечность машин», Изд-во Томского гос. ун-та, 1970 г.
 16. Потёмкин Б.А., Фролов К.В. О модельных представлениях биомеханической системы «человек-оператор» при случайном вибрационном воздействии // ДАН // СССР. – 1971. – Т. 197, № 6. – С. 1284-1287.
 17. Фролов К.В. О некоторых задачах биомеханики в связи с проблемой виброзащиты «человека оператора». В сб.: «Механика деформируемых тел и конструкций». – М.: Машиностроение, 1975. – С. 484-490.
 18. Пановко Г.Я., Трактовенко Б.Г. О модельном представлении тела человека, подверженного вибрационным воздействиям // Влияние вибраций на организм человека и проблемы виброзащиты. Тезисы докладов. Москва-Левково, 4 февраля 1974 г. – М.: Наука, 1974. – С. 38-41.
 19. Потёмкин Б.А., Фролов К.В. Построение динамической модели тела «человека-оператора», подверженного действию широкополосных случайных вибраций // Виброизоляция машин и виброзащита «человека-оператора». – М.: Наука, 1973. – С. 17-30.
 20. Фрадлин Б.Н. Динамика живых организмов в работах Я.И. Грдины // Прикладная механика. – 1962. – Т. 8, Вып. 6. – С. 581-591.