



МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВОЗДЕЙСТВИЯ ВИБРАЦИИ НА ТЕЛО ЧЕЛОВЕКА

Гулара Абдиева [0009-0001-2542-0074], Тулкин Мавлонов [0009-0005-3902-5074]

Абдиева Г.Б. - заведующая кафедрой “Прикладных наук и методов внешкольного образования НЦОПНМТО, к.т.н., **Мавланов Т.М.** - профессор кафедры “Теоретической и строительной механики”, д.т.н., ТИИИМСХ.

Аннотация: Работа посвящена построению модели и методику определения параметров предложенной модели. При этом учтены неупругие характеристики тела человека. Причем тело человека рассмотрены как линейную вязкоупругую механическую систему, позволяющую описывать динамические свойства тела с помощью частотных характеристик. При этом реальная структура тела человека заменяется набором соединенных между собой упругих и вязких элементов. Указанные модели качественно отражают такие свойства механического поведения тела человека, как изменение состояния тела при постоянных вибрационных воздействиях, затухания свободных колебаний и конечность резонансных амплитуд при установленных вынужденных колебаниях тела человека.

Ключевые слова: волна, динамическая реакция, вязкоупругая среда, сейсмическая воздействия, оболочка.

Annotatsiya: Ushbu maqolada taklif etilgan modelning parametrlarini aniqlash m'odeli va metodikasini qurishga bag'ishlangan. Shu bilan birga, inson tanasining noqonuniy tajribalari hisobga olingan. Bundan tashqari, odam tanasi chastotaviy xususiyatlar yordamida jismning dinamik xususiyatlarini tas'irlash imkonini beruvchi chiziqli qovushqoq mexanik tizim sifatida qaralgan. Bunda odam tanasining haqiqiy tuzilishi o'zaro bog'langan va qovushqoq elementlar bilan almashtiriladi. Ko'rsatilgan modellar inson harakatining mexanik xavflarini sifatli ravishda aks ettiradi.

Kalit so'zlar: to'lqin, dinamik reaksiya, qovushqoqlik holati, qobiq, seysmologik ta'sir.

Abstract: The paper is devoted to the construction of a model and the methodology for determining the parameters of the proposed model. At the same time, inelastic characteristics of the human body are taken into account. Moreover, the human body is considered as a linear viscoelastic mechanical system that allows describing the dynamic properties of the body using frequency characteristics. In this case, the real structure of the human body is replaced by a set of interconnected elastic and viscous elements. Said models qualitatively reflect such properties of mechanical behaviour of the human body as change in the state of the body under constant vibration effects, attenuation of free oscillations and finiteness of resonance amplitudes at established forced oscillations of the human body.

Key words: wave, dynamic response, viscoelastic medium, seismic impact, shell.

Введение

Вибрация является одним из физических факторов, с которыми люди часто сталкиваются в различных отраслях промышленности, транспорте и повседневной жизни. Длительное воздействие вибрации может привести к ряду негативных последствий для здоровья, таких как хронические заболевания опорно-двигательного аппарата, нарушения нервной системы и кровообращения. Исследование процессов воздействия вибрации на тело человека необходимо для разработки эффективных мер защиты работников и минимизации рисков для их здоровья.

Методология

Установлено, что в диапазоне 1-100 Гц расположены спектры частот вибрации разнообразных технических и технологических машин, станков. Причем виды вибрации, возникающей при работе различных машин, приведен в известной



работе [1 Тимошенко]. При малых колебаниях и достаточно малых частот возбуждения (до 100 Гц) тело человека можно рассматривать как линейную вязкоупругую механическую систему, позволяющую описывать динамические свойства тела с помощью частотных характеристик.

Следует отметить, что проблема математического описания реологических свойств тела человека остается нерешенным до сих пор. В [1 Тимошенко] также приведена детальная классификация вредного влияния вибрации и симптомы, вызываемые ею функциональных и физиологических нарушений.

Тело человека, рассматриваемое как вязкоупругая механическая система, обладает собственными частотами, и достаточно выраженными резонансными свойствами; резонансные частоты отдельных частей тела человека также приведены в [1 Тимошенко]. При этом реальная структура тела человека заменяется набором соединенных между собой упругих и вязких элементов. Указанные модели качественно отражают такие свойства механического поведения тела человека, как изменение состояния тела при постоянных вибрационных воздействиях, затухания свободных колебаний и конечность резонансных амплитуд при установившихся вынужденных колебаниях тела человека.

Дифференциальные соотношения вязкоупругости описывают реальное поведение тела человека. В данной работе к решению задач защиты человека от вибрационных действий привлекается аппарат наиболее общей наследственной теории вязкоупругости, основы которой были заложены в работах Больцмана-Вольтерра и развиты А.А.Ильюшиным, Б.Е.Победрой, Г.С.Писаренко, М.А.Колтуновым и др. авторами. При этом зависимость между напряжениями и деформациями принимается в виде линейной при одномерном деформировании

$$\sigma(t) = E\varepsilon(t) - E \int_0^t R(t-\tau)\varepsilon(\tau)d\tau, \quad (1)$$

где σ - напряжение; ε -деформация; t -время наблюдения; E -мгновенный модуль упругости; $R(t)$ -ядро релаксации

В общем случае используется слабо сингулярное ядро А.Р.Ржаницына-М.А.Колтунова $R(t) = \frac{A \exp(-\beta t)}{t^{1-\alpha}}$, которое, с одной стороны, весьма удовлетворительно отражает квазистатическое и динамическое поведение тела человека, а также наиболее удобно при проведении квазистатических и динамических расчетов.

Для практических расчетов и теоретических исследований системы ветрозащиты человека использует динамические модели тела человека в виде аналитических соотношений или в виде эквивалентных механических систем. При теоретическом моделировании тело человека представляется в виде механической системы, состоящий из некоторого числа твердых тел, сочлененных упругими и вязкими связями. Структуру модели тела человека необходимо выбрать с учетом экспериментальных данных, представленных частотными характеристиками. Применение классической теории вязкоупругости позволяет описывать динамические свойства тела человека с помощью частотных характеристик. Для этого вводим следующие функции: $G(p)$ и $Z(p)$. Функция $G(p)$ характеризует передаточную функцию для описания вынужденных колебаний точки наблюдения. Функция $Z(p)$ описывает связи между силой, передаваемой телу, и виброскоростью точки приложения силы. Кроме того, положительное значение $Z(p)$ называется импедансом. При теоретическом моделировании тело человека представляется в



виде механической системы, состоящей из некоторого числа твердых тел, сочлененных упругими и вязкоупругими связями. Структуру модели тела человека необходимо выбрать с учетом экспериментальных данных, представленных частотными характеристиками. В постановке задачи виброзащиты человека в практических расчетах используются различные модели. В случаях, когда необходимо ограничить вибрации на рабочем месте в пределах норм на допустимые уровни вибрации, целесообразно использовать модели, эквивалентному телу человека. С математической точки зрения задачи определения конечного числа параметров модели по известным числом характеристикам является известным. При этом задача ставится следующим образом. Задан входной механический импеданс модуля $|Z^*(i\omega)|$ и фазы $|\varphi^*(\omega)|$, полученных из эксперимента. Требуется построить динамическую модель тела человека с сосредоточенными параметрами.

Согласно [1-9] в общем виде входной импеданс модели ищут в виде

$$Z(p) = \frac{a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_0}{g_l p^l + g_{l-1} p^{l-1} + \dots + g_0} \quad (1)$$

где $a_n = f_n(m_i, c_i, b_i)$; $g_l = f_l(m_i, c_i, b_i)$ – функции, зависящие от инерционных m_i , упругих c_i и демпфирующих b_i параметров модели; n и l целые положительные числа, причем $n \leq l$. Значения a_n и g_l определяются по критерию минимума суммы среднеквадратических отклонений модуля $|Z(i\omega)|$ и фазы $\varphi(\omega)$ частотной характеристики.

$$\min K = \min \sum_0^N \left\{ \left| Z(j\omega_j) - Z(i\omega_j)^k \right|^2 + \left| \varphi(\omega_j) - \varphi(i\omega_j)^k \right|^2 \right\} \quad (2)$$

где N – число выбранных на частотной оси точек аппроксимации. Условие (2) удовлетворяется при

$$\frac{\partial K}{\partial (a_n, g_l)} = 0 \quad (3)$$

Выражение (3) после преобразований сводится к системе уравнений относительно неизвестных a_n и g_l .

Пример. Рассмотрим моделирование тела стоящего человека по известному входному механическому импедансу (рис.1). В этом случае модель можно представить в виде двух массовой колебательной системы (рис.2). Причем для входного механического импеданса модели примет вид [10-12]

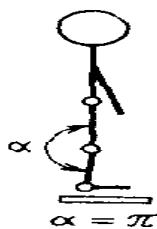


Рис.1. схема позы человека

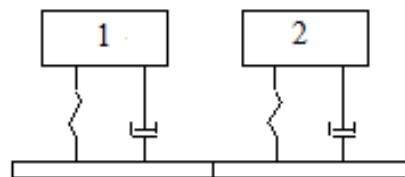


Рис.2. модель

$$Z(p) = \frac{a_4 p^4 + a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p}{g_4 p^4 + g_3 p^3 + g_2 p^2 + g_1 p + g_0} \quad (4)$$

откуда



$$|Z(i\omega)|^2 = \frac{(a_4\omega^4 - a_2\omega^2)^2 + (a_1\omega - a_3\omega^3)^2}{(g_4\omega^4 - g_2\omega^2 + g_0)^2 + (g_1\omega - g_3\omega^3)^2}$$

$$\varphi(\omega) = \arctg \frac{(a_1\omega - a_3\omega^3)(g_4\omega^4 - g_2\omega^2 + g_0) - (a_4\omega^4 - a_2\omega^2)(g_1\omega - g_3\omega^3)}{(a_4\omega^4 - a_2\omega^2)(g_4\omega^4 - g_2\omega^2 + g_0) + (g_1\omega - g_3\omega^3)(a_1\omega - a_3\omega^3)} \quad (5)$$

Подставляя (5) в (2) при фиксированных значениях частот га қүйиб, $\omega_j = 2\pi f_j$ (f_j равно 3,5,6,8,10,12,5 Гц.), а также соответствующие этим частотам экспериментальные значения $|Z^*(i\omega)|$ и фазы $|\varphi^*(\omega)|$, решая систему (3), получим следующие значения a_n и g_n :

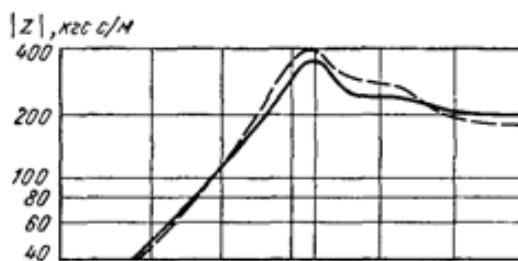
$$a_1 = 108.410^6; a_2 = 43.4110^5; a_3 = 560.3310^2; a_4 = 61.7; \\ g_0 = 14.3210^6; g_1 = 52.810^4; g_2 = 213.710^2; g_3 = 193.5; g_4 = 3.24.$$

Этим значениям соответствуют штриховые кривые рис.3. известная структуру модели определяет функциональную связь между a_n и g_n и параметрами модели:

$$a_1 = c_1c_2(m_1 + m_2); a_2 = (b_1c_2 + b_2c_1)(m_1 + m_2); \\ a_3 = b_1b_2(m_1 + m_2) + m_1m_2(c_1 + c_2); a_4 = m_1m_2(b_1 + b_2); \\ g_0 = c_1c_2; g_1 = b_1c_2 + b_2c_1; g_2 = m_1c_2 + m_2c_1 + b_1b_2; \\ g_3 = m_1b_2 + m_2b_1; g_4 = m_1m_2. \quad (6)$$

Из системы (6) определяют искомые параметры модели;

$$m_1 = 6.20 \frac{kgc^2}{m}; m_2 = 1.80 \frac{kgc^2}{m}; c_1 = 6.210^3 \frac{kgc}{m}; \\ c_2 = 8.10 \frac{kgc}{m}; b_1 = 140 \frac{kGCC}{m}; b_2 = 53 \frac{kGCC}{m}.$$



**Рис.3. Входной механический импеданс тело человека.
Сплошная кривая экспериментальные данные; штриховая –расчетные
данные.**

Аналогичным образом, используя уравнения (1)-(5) можно определить модели тело человека по заданным амплитудно-частотной и фаза-частотной характеристикам. Таким образом, если известны амплитудно-частотные характеристики, то можно построить модель человека и определить параметры построенной модели [13].

Список использованных литератур:

- [1]. Фролов К.В. Вибрации в технике. М.: “Машиностроение”. 1981 6 том, 456 с.
- [2]. Самарский А.А., Михайлов А.П. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры. 2 изд. испр. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. - 320 с.
- [3]. Хакимзянов Г.С., Чубаров Л.Б., Воронина П.Б. Математическое моделирование. – Новосибирск, РИТЦ НГУ, 2014. – 263 с.



- [4]. Ашихмин В.Н., Гитман И.Б., Келлер И.Э. и др. Введение в математическое моделирование. - М.: Логос, 2005. – 440 с.
- [5]. Lawson D. Marion G. An introduction to mathematical modeling. 2008. <http://people.maths.bris.ac.uk>
- [6]. Kuznetsov Iu.A. Mathematical modelling of biological processes. Nizhni Novgorod. 2015.
- [7]. Moghadas S.M., Taberi-Douraki M. Mathematical modelling. A graduate textbook. John Wiley and Sons, Inc. 2019.
- [8]. Heinz Stefan. Mathematical modelling. Springer.2011. www.twirpx.com.
- [9]. Yormatov G.Yo. va boshqalar. Hayot faoliyati xavfsizligi. –Т.:“Aloqachi”, 2009 yil. – 348 b.
- [10]. Ёрматов F.Ё. ва бошқалар. Ҳаёт фаолияти хавфсизлиги. Ўқув қўлланма. -Т.: 2005.
- [11]. Йўлдошев Ў. ва бошқалар. Мехнатни муҳофаза қилиш. -Т.: Мехнат, 2005.
- [12]. G'ouirov H.E. Hayot faoliyati xavfsizligi. –Т.: “Yangi asr avlodи”, 2007 yil. – 264 b.
- [13]. Белов С.В. и др. " Безопасность жизнедеятельности", "Высшая школа", -М.: 1999.