

ВОПРОСЫ ВИБРАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ОПЕРАТОРА ПРОМЫШЛЕННОГО ТРАКТОРА

И.Я. Березин¹, Ю.О. Петренко²

Регистрация динамических процессов в условиях реальной эксплуатации трактора позволила выявить источник низкочастотного вибрационного воздействия, обусловленный чередованием траков гусеницы в опорной ветви обвода, который по данным медико-биологических исследований является наиболее неблагоприятным для тела оператора. Рассмотрена линейная дискретная модель системы «виброзащитное кресло – таз – туловище – голова»; исследовано влияние динамических параметров виброзащитного кресла на уровень вибрационной нагруженности оператора.

Ключевые слова явление «бегущая волна», случайный вибрационный процесс, дискретная линейная модель, передаточная функция, спектральная плотность виброускорений, санитарные нормы

Промышленный трактор представляет собой связанную динамическую систему, элементы которой могут служить источниками вибрационного воздействия на корпус трактора и тело человека-оператора. Широкий спектр циклического возмущения определяется, с одной стороны, низкочастотным взаимодействием рабочих органов с внешней средой в диапазоне 0,15–1 Гц (бульдозирование, рыхление, транспортный режим по случайному профилю дороги) и высокочастотными колебаниями силовой установки в диапазоне 30–50 Гц (работа двигателя, трансмиссии и других агрегатов), с другой.

Как показывают результаты медико-биологических исследований, наибольшую опасность с точки зрения утомляемости и здоровья человека-оператора представляют вибрационные воздействия в диапазоне 2–20 Гц [1], так как именно в нем расположены резонансные частоты основных органов тела человека. Это также подчеркивается нормативными документами [2, 3], которые задают в указанном диапазоне частот предельные значения параметров вибраций при сертификационных испытаниях тракторов.

Как показали результаты экспериментальных исследований, проведенных на кафедре «Прикладная механика, динамика и прочность машин» ЮУрГУ [4], особое значение приобретает непрерывно действующее явление, вызванное перекачиванием каждого из опорных катков по звенчатой гусенице, лежащей на податливом основании. Отмеченное явление названо эффектом «бегущая волна»; его воздействие на корпус трактора можно представить в виде узкополосного случайного процесса изменения угла поворота между соседними звеньями гусеничной цепи, максимумы которого определяются изменчивостью податливости дорожного полотна, а частота чередования циклов – шагом гусеницы, скоростью движения трактора и случайным фазовым сдвигом левой и правой гусениц. Значения оценок математического ожидания и среднего квадратического отклонения максимумов углов поворота траков для различных грунтовых фонов приведены в таблице.

Статистические характеристики максимальных взаимных углов поворота между смежными траками

Грунтовый фон	Статистические характеристики	
	m_{ϕ} , (град)	σ_{ϕ} , (град)
Жесткая грунтовая дорога	8,6	5,1
Луговой фон	9,6	4,6
Песчаное покрытие	7,9	3,8

¹ Березин Игорь Яковлевич – доктор технических наук, профессор кафедры прикладной механики, динамики и прочности машин Южно-Уральского государственного университета

² Петренко Юлия Олеговна – аспирант, кафедра прикладной механики, динамики и прочности машин Южно-Уральского государственного университета

E-mail: yulyapetrenko@list.ru

Выполнена сравнительная оценка диапазонов «траковой» частоты, выявленной в результате натурального эксперимента, и установленного в результате медико-биологических исследований интервала резонансных частот для тела человека. Полученные результаты указывают на их достаточно близкое схождение. В связи с этим в предлагаемом исследовании ставится частная задача, в которой в качестве источника вибрационной нагруженности тела оператора промышленного трактора учитывается только кинематическое воздействие со стороны гусеничного двигателя.

В период с 60-х годов до настоящего времени в нашей стране центром исследований проблем защиты человека от вибрации являлся институт машиноведения РАН имени А.А. Благонравова, в котором под руководством академика К.В. Фролова были развернуты исследования по широкому кругу вопросов вибрационной безопасности. Результаты исследований в этой области опубликованы в научных трудах В.И. Бабицкого, И.И. Блехмана, И.И. Быховского, В.Л. Вейца, А.М. Мартыненко, А.А. Хачатурова, Ю.И. Иориша, М.З. Коловского, Г.Я. Пановко, Б.А. Потемкина и других авторов.

В основу исследования воздействия вибраций на оператора промышленного трактора положено допущение о том, что тело человека можно рассматривать как дискретную линейную вязкоупругую механическую систему, испытывающую случайные внешние воздействия. Обоснованием к выбору расчетной схемы послужили результаты, полученные Г.Я. Пановко [1, 5, 6]. На рис. 1 представлена заимствованная из [5] амплитудно-частотная характеристика, полученная при натуральных стендовых испытаниях, из которой следует, что в отмеченном ранее диапазоне частот четко проявляются три резонансные области.

В связи с этим была рассмотрена дискретная модель тела оператора с тремя степенями свободы. Внешнее воздействие (Y) на модель, в соответствии с ГОСТ 27259-87 (ИСО 7096-82), задается в виде функции спектральной плотности вертикальных ускорений, которую необходимо воспроизвести у основания кресла при проведении сертификационных испытаний. Таким образом, возникла необходимость рассматривать тело оператора совместно с виброзащитным креслом (рис. 2).

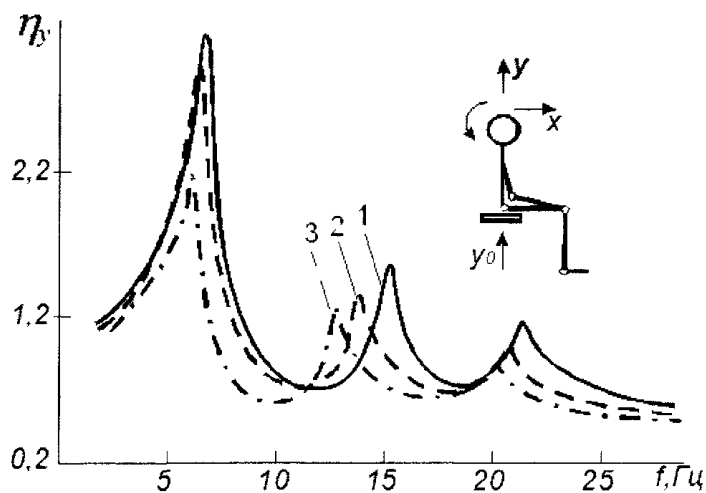


Рис. 1. Амплитудно-частотные характеристики тела сидящего человека, измеренные в направлении оси y , трехкомпонентной модели при значениях виброскорости (м/сек): 1 – 0,0015, 2 – 0,0052, 3 – 0,028

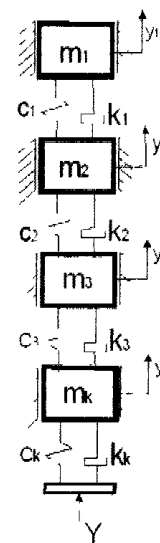


Рис. 2. Модель тела человека-оператора с учетом виброзащитного кресла

Параметры модели тела m_i, c_i, k_i ($i = 1, 2, 3$) заимствованы из справочной литературы [1]. Характеристики виброзащитного кресла m_k, c_k, k_k определены при стендовых испытаниях серийного варианта. Комплексная модель системы «виброзащитное кресло – тело человека-оператора» описывается системой с четырьмя степенями свободы и представляет собой систему четырех связанных дифференциальных уравнений (1)

$$\begin{aligned}
 m_1 \ddot{y}_1 &= -c_1 (y_1 - y_2) - k_1 (\dot{y}_1 - \dot{y}_2) \\
 m_2 \ddot{y}_2 &= -c_2 (y_2 - y_3) - k_2 (\dot{y}_2 - \dot{y}_3) + c_1 (y_1 - y_2) + k_1 (y_1 - y_2) \\
 m_3 \ddot{y}_3 &= -c_3 (y_3 - y_k) - k_3 (\dot{y}_3 - \dot{y}_k) + c_2 (y_2 - y_3) + k_2 (\dot{y}_2 - \dot{y}_3) \\
 m_k \ddot{y}_k &= -c_k (y_k - Y) - k_k (\dot{y}_k - \dot{Y}) + c_3 (y_3 - y_k) + k_3 (\dot{y}_3 - \dot{y}_k).
 \end{aligned} \tag{1}$$

В результате расчетных исследований получены передаточные функции, которые в последующем применяются при решении задач статистической механики. Полученные результаты показали, что модель тела оператора с виброзащитным креслом работает адекватно, поскольку на передаточных функциях элементов модели $W_{y_i/Y}, W_{y_k/Y}$ видно проявление четырех резонансных частот: кресла – 1,7 Гц; туловища – 5,1 Гц; головы – 10,1 Гц; таза – 11,4 Гц (рисунок 3а).

В нормативных документах по вибронегруженности операторов одним из основных критериев приняты значения виброускорений на сиденье кресла. Исходя из допущения о стационарности процессов колебаний, для каждого из отдельных элементов тела оператора, с помощью основного соотношения спектрального метода были получены спектральные плотности виброускорений, которые приведены на рис. 3, б. Из рис. 3, б видно, что из частей тела наиболее подверженной вибрационному воздействию оказалась голова оператора. Эти результаты характеризуют общую нагруженность элементов модели в широком интервале изменения частоты. Однако санитарные нормы [3] предусматривают не общую оценку, а соответствие среднеквадратических значений ускорений определенным полосам частот. В связи с этим рассмотренный интервал частот (от 2 – 20 Гц) представлен в виде третьоктавных полос, в каждой из которых определяются соответствующие этим полосам среднеквадратические значения виброускорений. Результаты расчетов показали, что в 6-й третьоктавной полосе (6,3 – 8 Гц) значения среднеквадратических отклонений виброускорений превышает допустимые санитарные нормы в 1,26 раза.

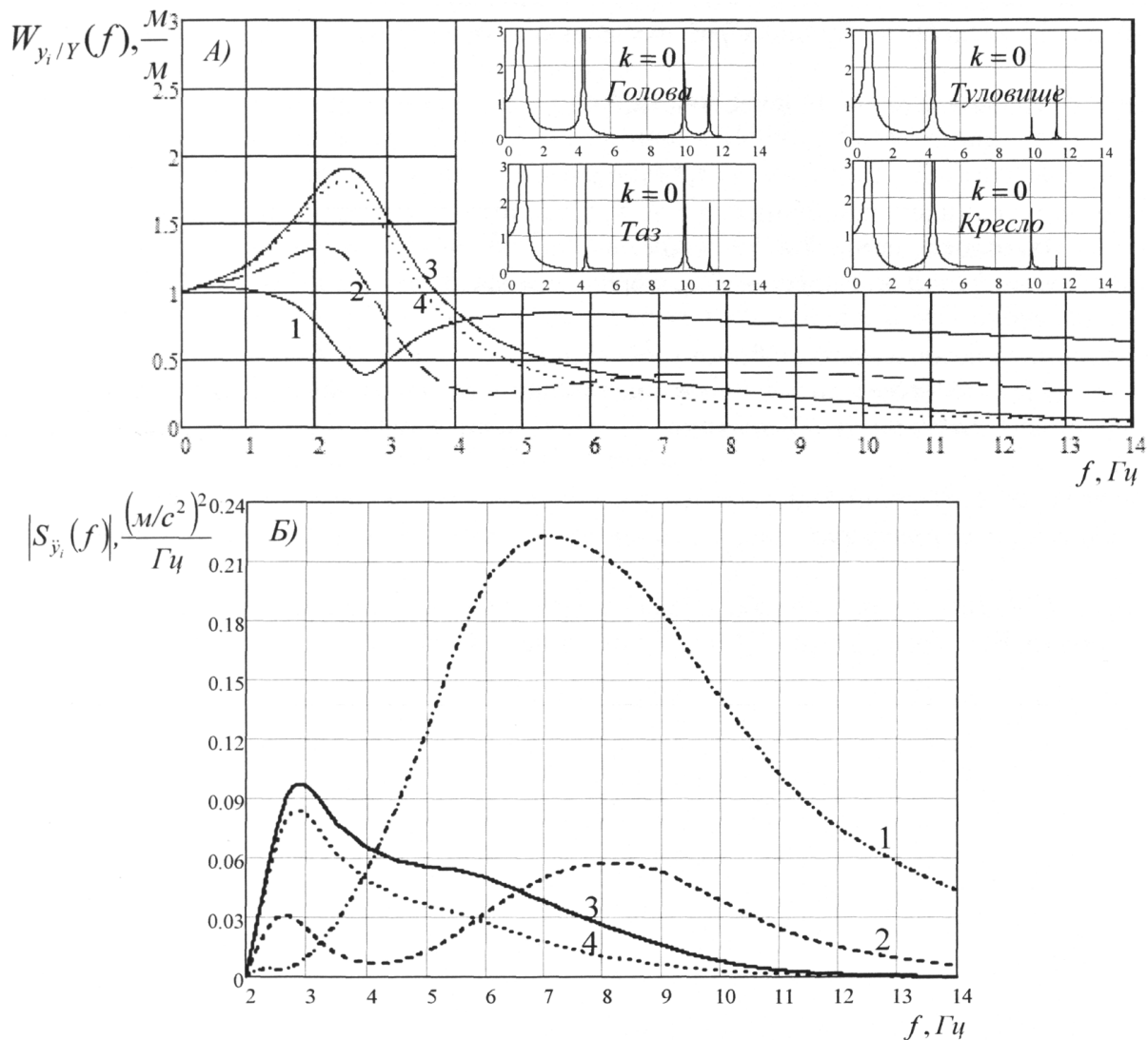


Рис. 3. А) Передаточные функции модели с креслом;
Б) Спектральные плотности виброускорений модели:
1 – кресло; 2 – таз; 3 – голова; 4 - туловище

С целью оценить влияние характеристик виброзащитного кресла на нагруженность оператора был задан диапазон возможных изменений параметров кресла относительно номинального значения. Результаты расчетов представлены на рис. 4, из которого видно, что возможно путем варьирования характеристик кресла, в частности уменьшения уровня демпфирования, добиться

желаемых значений среднеквадратических ускорений на кресле оператора. По-видимому, этот факт объясняется тем, что снижение демпфирования в зарезонансной области приводит к уменьшению уровня вибрационного воздействия.

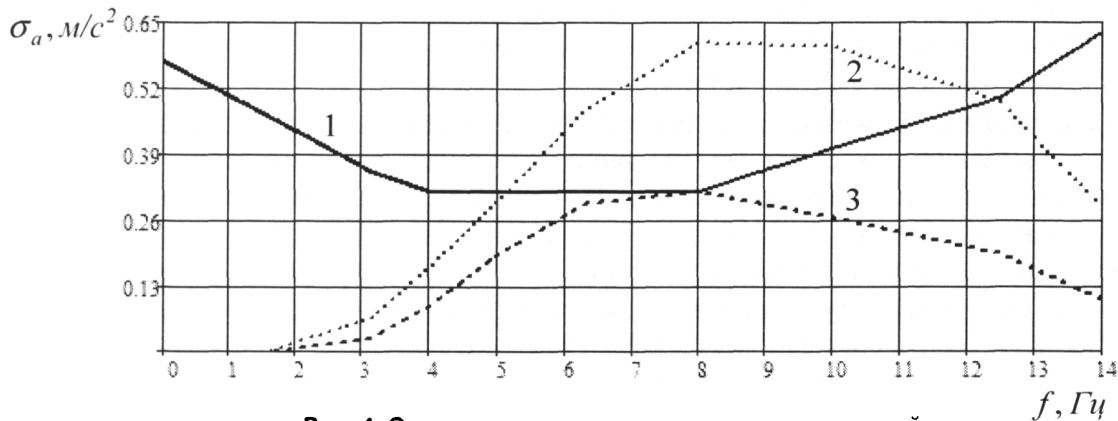


Рис. 4. Среднеквадратические значения ускорений:
1 – санитарные нормы; 2 – номинальное значение коэффициента демпфирования; 3 – коэффициент демпфирования уменьшен в 4 раза

Дальнейшее исследование планируется проводить в направлениях:

1. Проведение экспериментальных работ с целью проверки адекватности модели тела человека;
2. Совершенствование модели, в частности, учет угловых колебаний головы.

Литература

1. Вибрации в технике: справочник: в 6 т. Т. 6. Защита от вибрации и ударов / под ред. В.Н. Челомея. – М.: Машиностроение, 1981. – 456 с.
2. Машины землеройные. Сиденье оператора. Передаваемая вибрация. ГОСТ 27259-87 (ИСО 7096-82)
3. Вибрационная безопасность. Общие требования. ГОСТ 12.1.012-90.
4. Хрипунов, Д.В. Методы оценки вибронагруженности промышленного трактора со стороны гусеничного движителя: автореферат дис. ... канд. техн. наук / Д.В. Хрипунов. – Челябинск, 2002. – 22 с.
5. Пановко, Г.Я. Построение динамических моделей тела человека-оператора при вибрационных воздействиях: автореферат дис. ... канд. техн. наук / Г.Я. Пановко. – Машиноведение, 1973. – 28 с.
6. Пановко, Г.Я. Дискретная колебательная модель тела человека и определение ее параметров / Г.Я. Пановко, Б.Г. Трактовенко // Машиноведение. – 1974. – № 4. – С. 16–20.

PROBLEMS OF VIBRATION SAFETY OF OPERATOR OF INDUSTRIAL TRACTOR

I.Ya. Berezin¹, Yu.O. Petrenko²

Registration of dynamic processes in the context of real operation gave the researches opportunity to find the source of low-frequency vibration impact driven by rotation of caterpillar track in supporting frame of by-pass which is, according to biomedical researches, the most unfavorable for the body of the operator. The linear discrete model of the "Antivibration seat – Pelvis – Body – Head" system is studied as well as the impact of the dynamic parameters of antivibration seat on the level of vibrational load of the operator.

Keywords: progressive wave, haphazard vibrational process, discrete linear model, transfer function, spectral density of vibrational acceleration, sanitary standards.

References

1. Chelomey V.N. (ed.) *Vibratsii v tekhnike: spravochnik. T. 6. Zashchita ot vibratsii i udarov* (Vibration technology: a handbook. Vol. 6. Protection from vibration and shocks). Moscow: Mashinostroyeniye, 1981. 456 p. (in Russ.).

2. GOST 27259-87 (ISO 7096-82) *Mashiny zemleroynye. Siden'e operatora. Peredavaemaya vibratsiya*. (Earth-moving machinery. The operator's seat. Transmitted vibration.) (in Russ.).

3. GOST 12.1.012-90. *Vibratsionnaya bezopasnost'. Obshchie trebovaniya*. (GOST 12.1.012-90. Vibration safety. General requirements.) (in Russ.).

4. Khripunov D.V. *Metody otsenki vibronagruzhennosti promyshlennogo traktora so storony gusenichnogo dvizhitelya: avtoreferat dis. ... kand. tekhn. nauk* (Methods for assessing vibration loading the tractor from the caterpillar drive: synopsis of the cand. tech. sci. diss.). Chelyabinsk, 2002. 22 p. (in Russ.).

5. Panovko G.Ya. *Postroenie dinamicheskikh modeley tela cheloveka-operatora pri vibratsionnykh vozdeystviyakh: avtoreferat dis. ... kand. tekhn. nauk* (Building a dynamic model of the body of the human operator with vibration impacts: synopsis of the cand. tech. sci. diss.). Mashinovedenie, 1973. 28 p. (in Russ.).

6. Panovko G.Ya., Traktovenko B.G. Diskretnaya kolebatel'naya model' tela cheloveka i opredeleniye ee parametrov (Discrete vibrational model of the human body and the determination of its parameters). *Mashinovedenie*. 1974. no. 4. pp. 16–20. (in Russ.).

Поступила в редакцию 11 марта 2013 г.

¹ Berezin Igor Yakovlevich is Dr Sc (Engineering), Professor, Applied Mechanics, Dynamics and Strength of Machines Department, South Ural State University

² Petrenko Yulia Olegovna is Post-graduate Student, Applied Mechanics, Dynamics and Strength of Machines Department, South Ural State University

E-mail yuliyapetrenko@list.ru