

В.А. Александров, А.В. Александров, А.Ф. Волков, Л.Н. Лузанова

ВИБРОНАГРУЖЕННОСТЬ ОПЕРАТОРА ВАЛОЧНО-ПАКЕТИРУЮЩЕЙ МАШИНЫ ПРИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПЕРЕЕЗДАХ ПРИ ПОГРУЗКЕ ХЛЫСТОВ НА ЛЕСОВОЗ

Введение. Экспериментальными исследованиями [Александров, 1984] установлено, что значительные динамические нагрузки действуют на валочно-пакетирующую машину не только в процессе обработки (пакетирования) дерева, но и при технологических переездах и погрузке хлыстов на лесовоз. В этой связи при проектировании новых или модернизации серийно выпускаемых валочно-пакетирующих машин необходимо учитывать воздействие этих нагрузок на операторов.

На рис. 1 представлены расчетные схемы динамической системы «Оператор ВПМ – предмет труда – дерево»

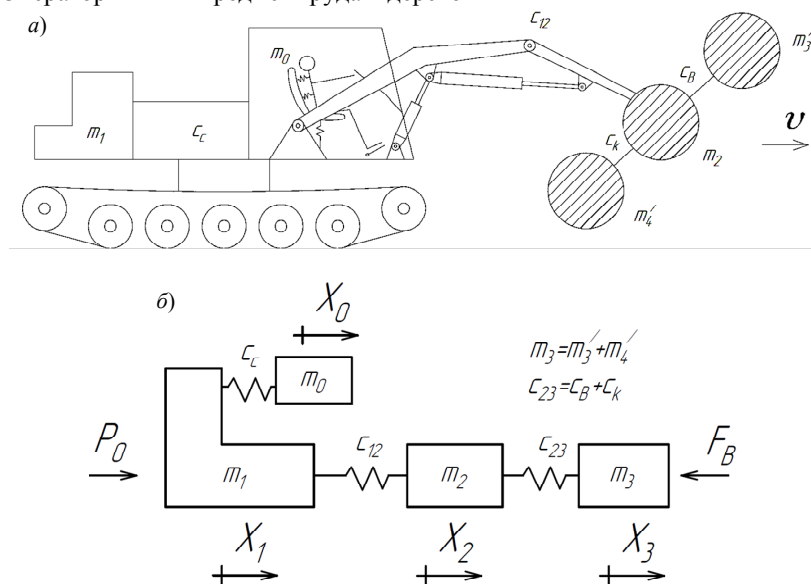


Рис. 1. Расчетные схемы: а – исходная; б – эквивалентная

Fig. 1. Calculation diagrams: a – basic; b – equivalent

Принятые обозначения:

m_0, m_1, m_2 и m_3 – соответственно приведенные массы машиниста (оператора), базовой машины, захватного устройства с манипулятором и дерева;

X_0, X_1, X_2 и X_3 – обобщенные координаты перемещения перечисленных выше масс;

c_c, c_{12} и c_{23} – приведенные жесткости соответственно спинки сидения, манипулятора и дерева;

P_0 – касательная сила тяги;

F_B – сопротивление перемещению дерева;

Кинетическая энергия динамической системы:

$$T = \frac{1}{2}m_0\dot{X}_0^2 + \frac{1}{2}m_1\dot{X}_1^2 + \frac{1}{2}m_2\dot{X}_2^2 + \frac{1}{2}m_3\dot{X}_3^2.$$

Потенциальная энергия системы:

$$\Pi = \frac{1}{2}c_c(X_1 - X_0)^2 + \frac{1}{2}c_{12}(X_1 - X_2)^2 + \frac{1}{2}c_{23}(X_2 - X_3)^2.$$

В соответствии с уравнением Лагранжа 2-го рода имеем:

$$\begin{aligned} & m_0\ddot{X}_0 + c_c X_0 = c_c X_1 \\ \left. \begin{array}{l} \frac{m_1}{m_0} \\ \frac{m_2}{m_1} \end{array} \right| & m_1\ddot{X}_1 + c_c(X_1 - X_0) + c_{12}(X_1 - X_2) = P_0 \\ & \frac{m_3}{m_2} \left. \begin{array}{l} \frac{m_2}{m_1} \\ \frac{m_3}{m_2} \end{array} \right| m_2\ddot{X}_2 + c_{23}(X_2 - X_3) = c_{12}(X_1 - X_2) \\ & m_3\ddot{X}_3 + F_B = c_{23}(X_2 - X_3). \end{aligned} \quad (1)$$

Домножим уравнение (1) системы (1) на m_1 , уравнение (2) на m_0 и вычтем из первого второе:

$$-m_0m_1(\ddot{X}_1 - \ddot{X}_0) + m_1c_cX_0 - m_0c_c(X_1 - X_0) - m_0c_{12}(X_1 - X_2) = m_1c_cX_1 - m_0P_0$$

или

$$m_0m_1(\ddot{X}_1 - \ddot{X}_0) + (m_1 + m_0)c_c(X_1 - X_0) + m_0c_{12}(X_1 - X_2) = m_0P_0. \quad (2)$$

Далее, домножим уравнение (3) системы (1) на m_3 , уравнение (4) на m_2 и вычтем:

$$m_2m_3(\ddot{X}_2 - \ddot{X}_3) + m_3c_{23}(X_2 - X_3) - m_2F_B = m_3c_{12}(X_1 - X_2) - c_{23}m_2(X_2 - X_3). \quad (3)$$

Домножим уравнение (2) системы (1) на m_2 , уравнение (3) на m_1 и вычтем:

$$\begin{aligned} m_1m_2(\ddot{X}_1 - \ddot{X}_2) + m_2c_c(X_1 - X_0) + m_2c_{12}(X_1 - X_2) - m_1c_{23}(X_2 - X_3) = \\ = m_2P_0 - m_1c_{12}(X_1 - X_2). \end{aligned} \quad (4)$$

Из уравнения (4) выразим $(X_2 - X_3)$ и $(\ddot{X}_2 - \ddot{X}_3)$, то есть

$$m_1 m_2 (\ddot{X}_1 - \ddot{X}_2) + m_2 c_c (X_1 - X_0) + (m_1 + m_2) c_{12} (X_1 - X_2) - \\ - m_3 c_{23} (X_2 - X_3) = m_2 P_0;$$

$$(X_2 - X_3) = \frac{m_1 m_2}{m_1 c_{23}} (\ddot{X}_1 - \ddot{X}_2) + \frac{m_2 c_c}{m_1 c_{23}} (X_1 - X_0) + \frac{(m_1 + m_2) c_{12}}{m_1 c_{23}} (X_1 - X_2) - \frac{m_2 P_0}{m_1 c_{23}};$$

$$(\ddot{X}_2 - \ddot{X}_3) = \frac{m_2}{c_{23}} (X_1^{IV} - X_2^{IV}) + \frac{m_2 c_c}{m_1 c_{23}} (\ddot{X}_1 - \ddot{X}_0) + \frac{(m_1 + m_2) c_{12}}{m_1 c_{23}} (\ddot{X}_1 - \ddot{X}_2).$$

Полученные значения для $(X_2 - X_3)$ и $(\ddot{X}_2 - \ddot{X}_3)$ подставим в уравнение (3):

$$\frac{m_2 m_3 m_2}{c_{23}} (X_1^{IV} - X_2^{IV}) + \frac{m_2 m_3 m_2 c_c}{m_1 c_{23}} (\ddot{X}_1 - \ddot{X}_0) + \frac{(m_1 + m_2) c_{12} m_2 m_3}{m_1 c_{23}} (\ddot{X}_1 - \ddot{X}_2) + \\ + \frac{m_3 c_{23} m_1 m_2}{m_1 c_{23}} (\ddot{X}_1 - \ddot{X}_2) + \frac{m_3 c_{23} m_2 c_c}{m_1 c_{23}} (X_1 - X_0) + \frac{(m_1 + m_2) c_{12} m_3 c_{23}}{m_1 c_{23}} (X_1 - X_2) - \\ - \frac{m_3 c_{23} m_2 P_0}{m_1 c_{23}} - m_2 F_B = m_3 c_{12} (X_1 - X_2)$$

или

$$\frac{m_2^2 m_3}{c_{23}} (X_1^{IV} - X_2^{IV}) + \frac{m_2^2 m_3 c_c}{m_1 c_{23}} (\ddot{X}_1 - \ddot{X}_0) + \left[\frac{(m_1 + m_2) c_{12} m_2 m_3 + m_3 m_2 m_1 c_{23}}{m_1 c_{23}} \right] \times \\ \times (\ddot{X}_1 - \ddot{X}_2) + \frac{(m_3 m_2 c_c)}{m_1} (X_1 - X_0) + \left[\frac{(m_1 + m_2) c_{12} m_3 - m_3 m_1 c_{23}}{m_1} \right] (X_1 - X_2) = (5) \\ = m_2 F_B + \frac{m_2 m_3 P_0}{m_1}.$$

Подставим в выражение (5) значения для $(X_1 - X_2) \dots (X_1^{IV} - X_2^{IV})$ и преобразуем.

Из уравнения (2) имеем:

$$(X_1 - X_2) = -\frac{m_0 m_1}{m_0 c_{12}} (\ddot{X}_1 - \ddot{X}_0) - \frac{(m_0 + m_1) c_c}{m_0 c_{12}} (X_1 - X_0) - \frac{m_0 P_0}{m_1 c_{12}},$$

$$(X_1 - X_2) = -\frac{m_1}{c_{12}} (\ddot{X}_1 - \ddot{X}_0) - \frac{(m_0 + m_1) c_c}{m_0 c_{12}} (X_1 - X_0) - \frac{P_0}{c_{12}},$$

$$(\ddot{X}_1 - \ddot{X}_2) = -\frac{m_1}{c_{12}} (X_1^{IV} - X_0^{IV}) - \frac{(m_0 + m_1) c_c}{m_0 c_{12}} (\ddot{X}_1 - \ddot{X}_0),$$

$$\begin{aligned}
 (X_1^{IV} - X_2^{IV}) = & -\frac{m_1}{c_{12}}(X_1^{VI} - X_0^{VI}) - \frac{(m_0 + m_1)c_c}{m_0c_{12}}(X_1^{IV} - X_0^{IV}), \\
 -\frac{m_2^2m_3m_1}{c_{23}c_{12}}(X_1^{VI} - X_0^{VI}) - & \frac{m_2^2m_3}{c_{23}}\frac{(m_0 + m_1)c_c}{m_0c_{12}}(X_1^{IV} - X_0^{IV}) + \frac{m_2^2m_3c_c}{m_1c_{23}}(\ddot{X}_1 - \ddot{X}_0) - \\
 -\frac{m_1}{c_{12}}\left[\frac{(m_1 + m_2)c_{12}m_2m_3 + m_3m_2m_1c_{23}}{m_1c_{23}}\right] & (X_1^{IV} - X_0^{IV}) - \frac{(m_0 + m_1)c_c}{m_0c_{12}} \times \\
 \times \left[\frac{(m_1 + m_2)c_{12}m_2m_3 + m_3m_2m_1c_{23}}{m_1c_{23}}\right] & (\ddot{X}_1 - \ddot{X}_0) + \frac{(m_2m_3)c_c}{m_1}(X_1 - X_0) - \\
 -\frac{m_1}{c_{12}}\left[\frac{(m_1 + m_2)c_{12}m_3 - m_3m_1c_{12}}{m_1}\right] & (\ddot{X}_1 - \ddot{X}_0) - \frac{(m_0 + m_1)c_c}{m_0c_{12}} \times \\
 \times \left[\frac{(m_1 + m_2)c_{12}m_3 - m_3m_1c_{12}}{m_1}\right] & (X_1 - X_0) - \frac{P_0}{c_{12}}\left[\frac{(m_1 + m_2)c_{12}m_3 - m_3m_1c_{12}}{m_1}\right] = \\
 = m_2F_B + \frac{m_2m_3P_0}{m_1}.
 \end{aligned}$$

И окончательно:

$$(X_1^{VI} - X_0^{VI}) + A(X_1^{IV} - X_0^{IV}) + B(\ddot{X}_1 - \ddot{X}_0) + C(X_1 - X_0) = D, \quad (6)$$

где

$$\begin{aligned}
 A = & \frac{m_2m_3 \left[m_2(m_0 + m_1)m_1c_c + m_1(m_1 + m_2)c_{12}m_0 + m_1^2m_0c_{23} \right]}{m_0m_1^2m_2^2m_3}, \\
 B = & \frac{(m_0 + m_1)c_c \left[(m_1 + m_2)c_{12}m_2m_3 + m_3m_2m_1c_{23} \right] - m_2^2m_3c_c m_0c_{12}}{m_0m_1^2m_2^2m_3} + \\
 & + \frac{m_1 \left[(m_1 + m_2)c_{12}m_3m_0c_{23} - m_3m_1c_{12}m_0c_{23} \right]}{m_0m_1^2m_2^2m_3}, \\
 C = & \frac{\left\{ (m_0 + m_1)c_c \left[(m_1 + m_2)c_{12}m_3 - m_3m_1c_{12} \right] - m_2m_3c_c m_0c_{12} \right\} c_{23}}{m_0m_1^2m_2^2m_3}, \\
 D = & -\left\{ \frac{P_0 \left[(m_1 + m_2)c_{12}m_3 - m_3m_1c_{12} \right] + m_2F_B m_1c_{12} + m_2m_3P_0c_{12}}{m_1^2m_2^2m_3} \right\} c_{23}
 \end{aligned}$$

$$\text{или} \\ D = - \left[\frac{P_0 m_2 c_{12} m_3 + m_2 c_{12} (m_2 F_B + m_3 P_0)}{m_1^2 m_2^2 m_3} \right] c_{23}.$$

Введя новую переменную $X_{01} = (X_1 - X_0) - D/C$, получим однородное уравнение вида:

$$X_{01}^{VI} + AX_{01}^{IV} + BX_{01}^E + CX_{01} = 0. \quad (7)$$

Решение уравнения (7) запишется как:

$$X_{01} = (C_1 \cos kt + C_2 \sin kt) + (C_3 \cos nt + C_4 \sin nt) + (C_5 \cos mt + C_6 \sin mt). \quad (8)$$

Пример.

Исходные данные примем применительно к ВПМ ЛП-19А:

Объем погружаемых деревьев $V = 2,5 \text{ м}^3$; $G_D = 20000 \text{ Н}$; $m_0 = 80 \text{ кг}$; $m_1 = 25000 \text{ кг}$; $m_2 = 2740 \text{ кг}$; $m_3 = 2100 \text{ кг}$; $c_c = 5 \cdot 10^3 \text{ Н/м}$; $c_{12} = 620 \cdot 10^3 \text{ Н/м}$; $c_{23} = 65 \cdot 10^3 \text{ Н/м}$.

Решаем уравнение (7) методом Рунге–Кутты с помощью среды программирования MathCAD при начальных условиях соответственно:

– в режиме разгона системы

$$X_{01} = \dot{X}_{01} = \ddot{X}_{01} = X_{01}^{IV} = X_{01}^V = 0,$$

$$\ddot{X}_{01} = \frac{v}{t_p} = 0,2; 0,4; 0,6; 0,8 \text{ м/с}^2;$$

– в режиме стопорения системы

$$\dot{X}_{01} = 0,01; 0,02; 0,03; 0,04 \text{ м/с}.$$

Определяем коэффициенты дифференциального уравнения (7)

$$A = 3,376 \cdot 10^2; B = 16759,9; C = 366,93 \cdot 10^2.$$

В табл. 1, 2 приведены расчетные данные вибрационного воздействия на оператора ВПМ в режимах разгона и стопорения.

Установлено, что перемещения оператора на сиденье не превышают 0,027...0,034 м, в то время как уровень виброускорений превышает допустимый по санитарным нормам в 1,5–2 раза. Уровень динамической нагрузки на спину оператора при ускорениях разгона 0,6...0,8 м/с² также значителен.

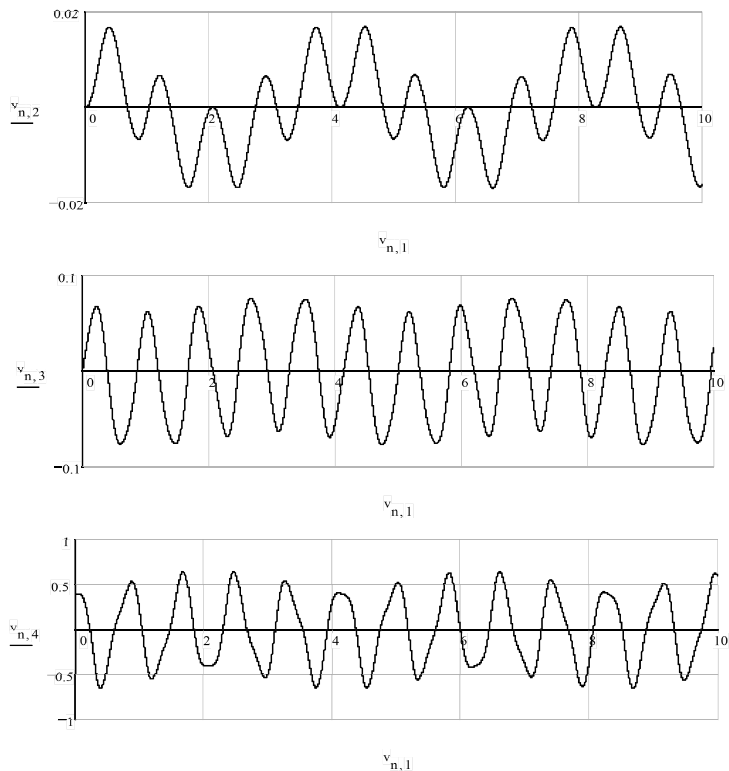


Рис. 2. Графики вибрационного воздействия на оператора ВПМ в режиме разгона при технологическом переезде ($v/t_p = 0,4 \text{ м/с}^2$):

$v_{n,2}$ – виброперемещение; $v_{n,3}$ – виброскорость; $v_{n,4}$ – виброускорение

Fig. 2. Charts of vibration impact on the feller-buncher operator in the acceleration mode at technological crossing ($v/t_p = 0.4 \text{ m/s}^2$):

$v_{n,2}$ – vibration displacement; $v_{n,3}$ – vibration velocity; $v_{n,4}$ – vibration acceleration

Таблица 1

Характеристики вибрационного воздействия на оператора ВПМ в режиме разгона ($c_c = 5 \text{ кН/м}$)

Characteristics of vibration impact on the feller-buncher operator in acceleration mode ($c_c = 5 \text{ kN/m}$)

Характеристики	$\dot{X}_{01} = v/t_p, \text{ м/с}^2$			
	0,2	0,4	0,6	0,8
$X_{01}, \text{ м}$	0,008	0,017	0,025	0,034
$\dot{X}_{01}, \text{ м/с}^2$	0,326	0,652	0,979	1,305
$Q_{\text{дин}}, \text{ Н}$	40	85	125	170

Таблица 2

**Характеристики вибрационного воздействия на оператора ВПМ
в режиме стопорения**

**Characteristics of vibration impact on the feller-buncher operator
in the stopping mode**

Характеристики	$\dot{X}_{01}, \text{ м/с}$			
	0,01	0,02	0,03	0,04
$X_{01}, \text{ м}$	0,007	0,014	0,021	0,027
$\ddot{X}_{01}, \text{ м/с}^2$	0,017	0,034	0,052	0,069
$Q_{\text{лин}}, \text{ Н}$	35	70	105	135

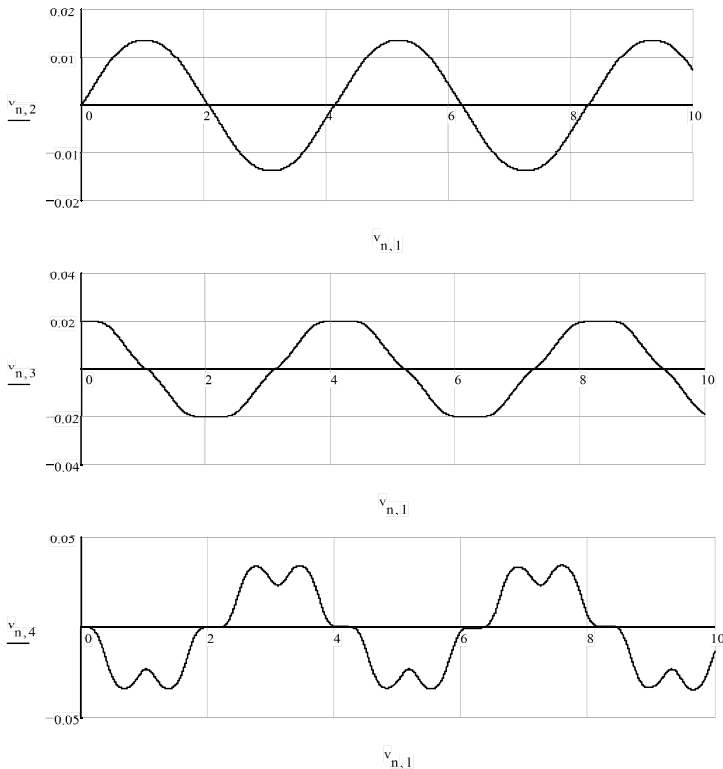


Рис. 3. Графики вибрационного воздействия на оператора ВПМ в режиме стопорения при технологическом переезде ($\dot{X}_{01} = 0,02 \text{ м/с}$):

$v_{n,2}$ – виброперемещение; $v_{n,3}$ – виброскорость; $v_{n,4}$ – виброускорение

Fig. 3. Graphs of vibration impact on the feller-buncher operator in the stopping mode during technological crossing ($\dot{X}_{01} = 0.02 \text{ m/s}$): $v_{n,2}$ – vibration displacement:

$v_{n,3}$ – vibration velocity; $v_{n,4}$ – vibration acceleration

Выводы

1. Анализируя полученные расчетные данные, можно заметить, что определяющее влияние на уровень вибровоздействий на оператора ВПМ в режимах разгона оказывает форсирование пускового режима. Для нормальных условий работы оператора необходимо рекомендовать в режимах разгона не превышать ускорения более $0,2...0,4 \text{ м/с}^2$.

2. Из полученных данных необходимо констатировать, что динамическая нагруженность машин и операторов при технологических переездах сопровождается значительной нагрузкой.

3. Разработанная модель системы "Оператор – ВПМ – предмет труда" позволяет определить вибрационное воздействие на оператора в режимах разгона и стопорения при технологических переездах с погрешностью $6,0-9,5\%$.

Библиографический список

Александров В.А. Моделирование технологических процессов лесных машин. М.:Экология, 1995. 256 с.

Гасымов Г.Ш., Александров В.А. Нагрузки в элементах конструкций валочно-пакетирующих машин. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. 155 с

Мартынова Н.Б. Вибронагруженность оператора валочно-пакетирующей машины в режиме аварийного сброса пакетируемого дерева // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2009. Вып. 189, С. 11–118.

Мартынова Н.Б., Александров В.А. Вибронагруженность оператора валочно-пакетирующей машины в режиме преодоления препятствия методом «вывешивания» // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2009. Вып. 188. С. 155–161.

References

Aleksandrov V.A. Modeling of technological processes wood mashin. M.: Экология, 1995. 256 p. (In Russ.)

Gasymov G.Sh, Aleksandrov V.A. Loadings in elements of designs valочно-packaging mashin. SPb.: Izd.-vo Politehn. Un-ta, 2009. 155 p. (In Russ.)

Martynova N.B. Vibronagruzhennost of the operator of the valочно-packaging car in a mode of emergency dump of a packaged tree. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehnikeskoj Akademii*, 2009, iss. 189, pp. 11–118. (In Russ.)

Martynova N.B., Aleksandrov V.A. Вибронагруженность the operator of the valочно-packaging car in a mode of overcoming of an obstacle "a posting" method. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehnikeskoj Akademii*, 2009, iss. 188, pp. 155–161. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 04.05.2022

Александров В.А., Александров А.В., Волков А.Ф., Лузанова Л.Н. Вибронагруженность оператора валочно-пакетирующей машины при технологических переездах при погрузке хлыстов на лесовоз // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2022. Вып. 239. С. 181–190. DOI: 10.21266/2079-4304.2022.239.181-190

Разработана математическая модель динамической системы: «Валочно-пакетирующая машина – предмет труда – дерево». Математическое описание составлено в форме уравнения Лагранжа 2-го рода. Система уравнений решена методом Рунге – Кутты, с помощью среды программирования MathCAD. Аprobация модели осуществлена на примере серийно выпускаемых валочно-пакетирующих машин ЛП-19А в режимах разгона и стопорения.

Ключевые слова: валочно-пакетирующая машина, математическая модель, колебания, сиденье, вибрация, масса, оператор.

Aleksandrov V.A., Aleksandrov A.V., Volkov A.F., Luzanova L.N. The vibration stress of the feller-buncher operator during the process of loading the logs onto a timber truck. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhniceskoj Akademii*, 2022, iss. 239, pp. 181–190 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2022.239.181-190

In article the dynamic model of system is developed «the operator – skidding tractor – tree bunch». The mathematical description is worked out in the form of the equation of Lagrange second number. The system of the equations is solved concerning elastic deformation of the suspension seats. Model approbation is carried out on an example of serially felling and skidding machine LP-19A.

Key words: faller bencher, mathematical models, shake, buffeting, vibration, seat, operator.

АЛЕКСАНДРОВ Валентин Александрович – профессор Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, доктор технических наук.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: ftacademy@home.ru

ALEKSANDROV Valentin A. – DSc (Technical), St.Petersburg State Forest Technical University.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: ftacademy@home.ru

АЛЕКСАНДРОВ Алексей Валентинович – доцент Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, кандидат технических наук.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: ftacademy@home.ru

ALEKSANDROV Aleksei V. – St. Petersburg State Forest Technical University.
194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: ftacademy@home.ru

ВОЛКОВ Александр Федорович – магистр Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: ftacademy@home.ru

VOLKOV Aleksandr F. – St. Petersburg State Forest Technical University.
194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: ftacademy@home.ru

ЛУЗАНОВА Людмила Николаевна – старший преподаватель Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: ftacademy@home.ru

LUZANOVA Lyudmila N. – St. Petersburg State Forest Technical University.
194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: ftacademy@home.ru