

В.А. Александров, А.В. Александров, А.А. Бучников

ВИБРОНАГРУЖЕННОСТЬ ОПЕРАТОРА ВАЛОЧНО-ПАКЕТИРУЮЩЕЙ МАШИНЫ ПРИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПЕРЕЕЗДАХ

Введение. Экспериментальными исследованиями [Александров и др., 2017] установлено, что значительные динамические нагрузки действуют на валочно-пакетирующую машину не только в процессе обработки (пакетирования) дерева, но и при технологических переездах. В этой связи при проектировании новых или модернизации серийно выпускаемых валочно-пакетирующих машин необходимо учитывать воздействие этих нагрузок на операторов и в процессе переездов по лесосеке.

На рис. 1 представлены расчетные схемы динамической системы «Оператор – валочно-пакетирующая машина – предмет труда- дерево».

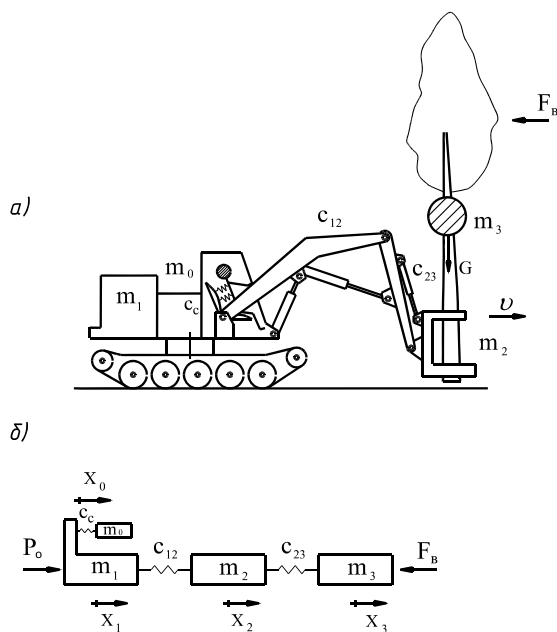


Рис. 1. Расчетная схема: а – исходная, б – эквивалентная

Fig. 1. Calculation scheme: а – basic, б – equivalent

Принятые обозначения:

m_0, m_1, m_2, m_3 – соответственно приведенные массы машиниста (оператора), базовой машины, захватно-срезающего устройства и манипулятора, и дерева; X_1, X_2, X_3, X_0 – обобщенные координаты перемещения перечисленных выше масс; C_c, C_{12}, C_{23} – приведенные жесткости соответственно сидения, упругой связи (манипулятора) и дерева; P_0 – касательная сила тяги; F_b – сопротивление перемещению дерева.

Кинетическая энергия динамической системы:

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

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:

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

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

$$m_0 m_1 (\ddot{X}_1 - \ddot{X}_0) + (m_1 + m_0) C_c (X_1 - X_0) + m_0 C_{12} (X_1 - X_2) = m_0 P_0. \quad (2)$$

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

$$m_2 m_3 (\ddot{X}_2 - \ddot{X}_3) + m_3 C_{23} (X_2 - X_3) - m_2 F_b = m_3 C_{12} (X_1 - X_2) - C_{23} m_2 (X_2 - X_3). \quad (3)$$

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

$$\begin{aligned} m_1 m_2 (\ddot{X}_1 - \ddot{X}_2) + m_2 C_c (X_1 - X_0) + m_2 C_{12} (X_1 - X_2) - m_1 C_{23} (X_2 - X_3) = \\ = m_2 P_0 - m_1 C_{12} (X_1 - X_2). \end{aligned} \quad (4)$$

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

$$\begin{aligned} m_1 m_2 (\ddot{X}_1 - \ddot{X}_2) + m_2 C_c (X_1 - X_0) + (m_1 + m_2) C_{12} (X_1 - X_2) - m_1 C_{23} (X_2 - X_3) = \\ = m_2 P_0, \end{aligned}$$

$$(X_2 - X_3) = \frac{m_1 m_2}{m_1 C_{23}} (\dot{X}_1 - \dot{X}_2) + \frac{m_2 C_c}{m_1 C_{23}} (X_1 - X_0) + \frac{(m_1 + m_2) C_{12}}{m_1 C_{23}} (X_1 - X_2) - \frac{m_2 P_0}{m_1 C_{23}};$$

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

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

$$\frac{m_2 m_3 m_2}{C_{23}} (X_1^{IV} - X_2^{IV}) + \frac{m_2 m_3 m_2 C_c}{m_1 C_{23}} (\ddot{X}_1 - \ddot{X}_0) + \frac{(m_1 + m_2) m_3 m_2 C_{12}}{m_1 C_{23}} (\ddot{X}_1 - \ddot{X}_2) +$$

$$+ \frac{m_3 C_{23} m_1 m_2}{m_1 C_{23}} (\ddot{X}_1 - \ddot{X}_2) + \frac{m_2 C_{23} C_c}{m_1 C_{23}} (X_1 - X_0) + \frac{(m_1 + m_2) C_{12} m_3 C_m}{m_1 C_{23}} (X_1 - X_2) -$$

$$- \frac{m_3 C_{23} m_2 P_0}{m_1 C_{23}} - m_2 F_B = m_3 C_{12} (X_1 - X_2).$$

или

$$m_2^2 m_3 (X_1^{IV} - X_2^{IV}) + \frac{m_3 m_2^2 C_c}{m_1 C_{23}} (\ddot{X}_1 - \ddot{X}_0) +$$

$$+ \left[\frac{m_3 m_2 (m_1 + m_2) C_{12} + m_3 C_{23} m_1 m_2}{m_1 C_{23}} \right] (\ddot{X}_1 - \ddot{X}_2) + \frac{m_3 m_2 C_c}{m_1} (X_1 - X_0) + \quad (5)$$

$$+ \left[\frac{(m_1 + m_2) C_{12} m_3 - m_3 C_{12} m_1}{m_1} \right] (X_1 - X_2) = m_2 F + \frac{m_3 m_2 P_0}{m_1}.$$

Подставим в выражение (5) значения для $(X_1 - X_2) \dots (X_1^{IV} - X_2^{IV})$ и преобразуем. Из уравнения (2) имеем:

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

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

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

$$(X_1^{IV} - X_2^{IV}) = -\frac{m_1}{C_{12}} (X_1^{VI} - X_0^{VI}) - \frac{(m_0 + m_1) C_c}{m_0 C_{12}} (X_1^{IV} - X_0^{IV}).$$

$$\begin{aligned}
 & -\frac{m_3 m_2^2 m_1}{C_{23} C_{12}} (X_1^{VI} - X_0^{VI}) + \frac{m_3 m_2^2 (m_0 + m_1) C_c}{C_{23} m_0 C_{12}} (X_1^{IV} - X_0^{IV}) + \\
 & + \frac{m_3 m_2^2 C_c}{m_1 C_{23}} (\ddot{X}_1 - \ddot{X}_0) - \frac{m_1}{C_{12}} \left[\frac{m_2 m_3 (m_1 + m_2) C_{12} + m_3 C_{23} m_1 m_2}{m_1 C_{23}} \right] (X_1^{IV} - X_0^{IV}) - \\
 & - \frac{(m_0 + m_1) C_c}{m_0 C_{12}} \left[\frac{m_2 m_3 (m_1 + m_2) C_{12} + m_3 C_{23} m_1 m_2}{m_1 C_{23}} \right] (\ddot{X}_1 - \ddot{X}_0) + \\
 & + \frac{m_2 m_3 C_c}{m_1} (X_1 - X_0) - \frac{m_1}{C_{12}} \left[\frac{(m_1 + m_2) C_{12} m_3 - m_3 C_{12} m_1}{m_1} \right] (\ddot{X}_1 - \ddot{X}_0) - \\
 & - \frac{(m_0 + m_1) C_c}{m_0 C_{12}} \left[\frac{(m_1 + m_2) C_{12} m_3 - m_3 C_{12} m_1}{m_1} \right] (X_1 - X_0) - \\
 & - \frac{P_0}{C_{12}} \left[\frac{(m_1 + m_2) C_{12} m_3 - m_3 C_{12} m_1}{m_1} \right] = m_2 F_B + \frac{m_2 m_3 P_0}{m_1}
 \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}
 A &= \frac{m_2 m_3 [m_2 (m_0 + m_1) m_1 C_c + m_1 (m_1 + m_2) C_{12} m_0 + m_1^2 m_0 C_{23}]}{m_0 m_1^2 m_2^2 m_3}, \\
 B &= \frac{(m_0 + m_1) C_c [(m_1 + m_2) C_{12} m_2 m_3 + m_3 m_2 m_1 C_{23}] - m_2^2 m_3 C_c m_0 C_{12} +}{m_0 m_1^2 m_2^2 m_3} + \\
 & + \frac{m_1 [(m_1 + m_2) C_{12} m_3 m_0 C_{23} - m_3 m_1 C_{12} m_0 C_{23}]}{m_0 m_1^2 m_2^2 m_3}, \\
 C &= \frac{\{(m_0 + m_1) C_c [(m_1 + m_2) C_{12} m_3 - m_3 m_1 C_{12}] - m_2 m_3 C_c m_0 C_{12}\} C_{23}}{m_0 m_1^2 m_2^2 m_3}, \\
 D &= - \left\{ \frac{P_0 [(m_1 + m_2) C_{12} m_3 - m_3 m_1 C_{12}] + m_2 F_B m_1 C_{12} + m_2 m_3 P_0 C_{12}}{m_1^2 m_2^2 m_3} \right\} C_{23}
 \end{aligned}$$

или

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

Введя новую переменную $\theta_1 = (X_1 - X_0) - D/C$, получим однородное уравнение вида:

$$\theta_1^{VI} + A\theta_1^{IV} + B\ddot{\theta}_1 + C\theta_1 = 0. \quad (7)$$

Решение уравнения (7) запишем как:

$$\theta_1 = (C_1 \cos kt + C_2 \sin kt) + (C_3 \cos nt + C_4 \sin nt) + (C_5 \cos mt + C_6 \sin mt). \quad (8)$$

Пример. Исходные данные примем применительно к ВПМ ЛП-19А:
Объем дерева

$$V = 2,0 \text{ м}^3 \quad (G_{\text{д}} = 20 \text{ 000 Н}); \quad m_2 = 2140 \text{ кг}; \quad m_1 = 25000 \text{ кг}; \quad m_0 = 80 \text{ кг};$$

$$m_3 = 1029 \text{ кг}; \quad C_{12} = 420 \text{ кН/м}; \quad C_c = 5 \text{ кН/м}, 10 \text{ кН/м}; \quad C_{23} = 65 \text{ кН/м}.$$

$$\vartheta / t_p = 0,2; 0,4; 0,6; 0,8 \text{ м/с}^2; \quad \dot{X}_0 = 0,01; 0,02; 0,03; 0,04 \text{ м/с}.$$

1. Определяем коэффициент дифференциального уравнения (7):

– при $C_c = 5 \text{ кН/м}$

$$A = 306,091/\text{с}^2; \quad B = 15799,81/\text{с}^4; \quad C = 319451/\text{с}^6;$$

– при $C_c = 10 \text{ кН/м}$; $A = 612,181/\text{с}^2$; $B = 31599,61/\text{с}^4$; $C = 638901/\text{с}^6$

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

– в режиме разгона системы

$$\theta_1 = \dot{\theta}_1 = \ddot{\theta}_1 = \theta_1''' = \theta_1^V = 0;$$

$$v / t_p = \dot{Q}_1 = 0,2; 0,4; 0,6; 0,8 \text{ м/с}^2;$$

– в режиме стопорения системы

$$\theta_1 = \ddot{\theta}_1 = \ddot{\theta}_1''' = \theta_1^V = 0;$$

$$\dot{\theta}_1 = 0,01; 0,02; 0,03; 0,04 \text{ м/с},$$

получим расчетные данные, приведенные в табл. 1–4.

Таблица 1

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

**Characteristics of vibration impact on the operator of feller-buncher
in the acceleration mode ($C_c = 5 \text{ кН/м}$)**

Характеристики	$\vartheta / t_p, \text{ м/с}^2$			
	0,2	0,4	0,6	0,8
$X_{01}, \text{ м}$	0,009	0,017	0,026	0,035
$\dot{X}_{01}, \text{ м/с}$	0,046	0,093	0,139	0,185
$\ddot{X}_{01}, \text{ м/с}^2$	0,363	0,726	1,0289	1,452
$\theta_{\text{дин}}, \text{ Н}$	45	85	130	175

Таблица 2

**Характеристики вибрационного воздействия на оператора ВПМ
в режиме стопорения ($C_c = 5$ кН/м)**

**Characteristics of vibration impact on the operator of feller-buncher
in the stopping mode ($C_c = 5$ kN/m)**

Характеристики	$\dot{\theta}_1, \text{ м/с}$			
	0,01	0,02	0,03	0,04
$X_{01}, \text{ м}$	0,007	0,014	0,022	0,029
$\dot{X}_{01}, \text{ м/с}$	0,011	0,022	0,033	0,044
$\ddot{X}_{01}, \text{ м/с}^2$	0,019	0,039	0,058	0,077
$\theta_{\text{дин}}, \text{ Н}$	35	70	110	145

Таблица 3

**Характеристики вибрационного воздействия на оператора ВПМ
в режиме разгона ($C_c = 10$ кН/м)**

**Characteristics of vibration influence on the operator of feller-buncher
in the acceleration mode ($C_c = 10$ kN/m)**

Характеристики	$\partial/t_p, \text{ м/с}^2$			
	0,2	0,4	0,6	0,8
$X_{01}, \text{ м}$	0,008	0,016	0,024	0,032
$\dot{X}_{01}, \text{ м/с}$	0,037	0,075	0,112	0,149
$\ddot{X}_{01}, \text{ м/с}^2$	0,262	0,524	0,786	1,049
$\theta_{\text{дин}}, \text{ Н}$	80	160	240	320

Таблица 4

**Характеристики вибрационного воздействия на оператора ВПМ
в режиме стопорения ($C_c = 10$ кН/м)**

**Characteristics of vibration influence on the operator of feller-buncher
in the arresting mode ($C_c = 10$ kN/m)**

Характеристики	$\dot{\theta}_1, \text{ м/с}$			
	0,01	0,02	0,03	0,04
$X_{01}, \text{ м}$	0,007	0,014	0,022	0,029
$\dot{X}_{01}, \text{ м/с}$	0,010	0,021	0,031	0,042
$\ddot{X}_{01}, \text{ м/с}^2$	0,018	0,035	0,053	0,071
$\theta_{\text{дин}}, \text{ Н}$	70	140	220	290

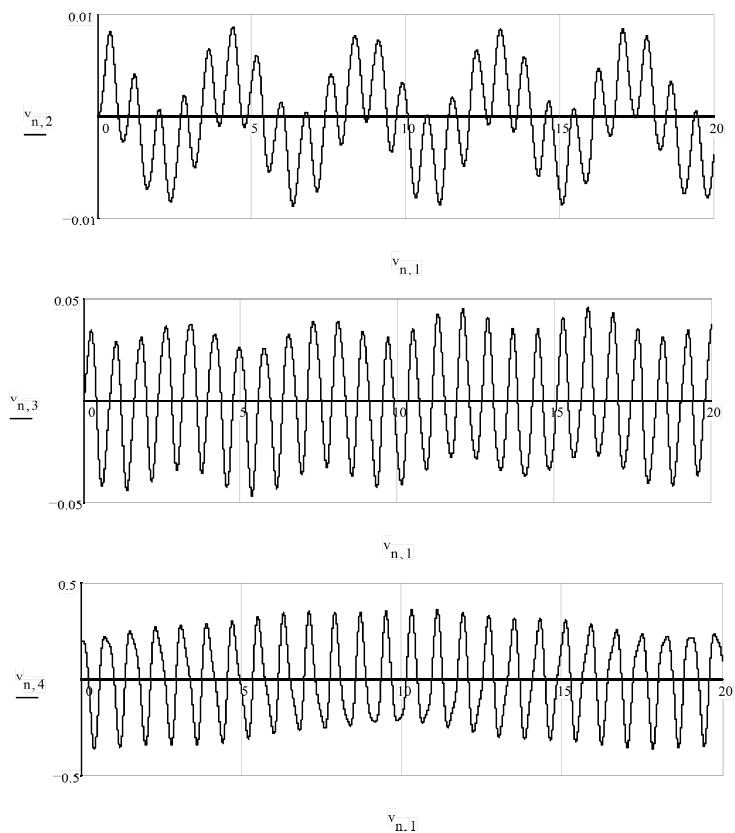


Рис. 2. Графики вибрационного воздействия на оператора ВПМ в режиме разгона при технологическом переезде ($C_c = 5 \text{ кН/м}$, $V/t_p = 0,2 \text{ м/с}^2$):

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

Fig. 2. Plots of vibration impact on the operator of feller-buncher in the acceleration mode at the technological crossing ($C_c = 5 \text{ kN/m}$, $V/t_p = 0.2 \text{ m/s}^2$):

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

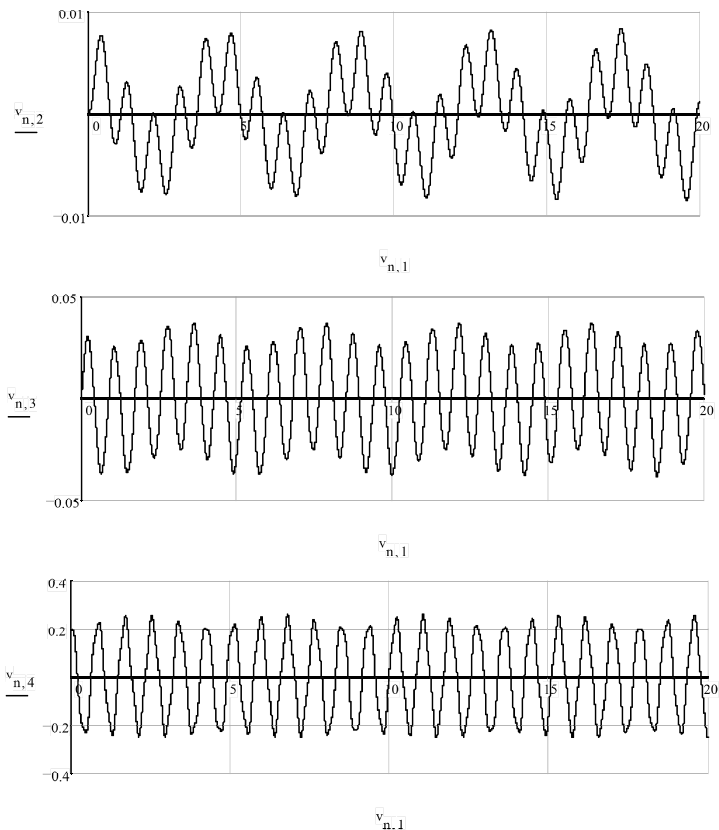


Рис. 3. Графики вибрационного воздействия на оператора ВПМ в режиме стопорения при технологическом переезде ($Q_3 = V/t_p = 0,2 \text{ м/с}^2$, $C_c = 10 \text{ кН/м}$:
 $v_{n,2}$ – виброперемещение, $v_{n,3}$ – виброскорость, $v_{n,4}$ – виброускорение

Fig. 3. Graphs of vibration impact on the operator of feller-buncher in the stopping mode at the technological crossing ($Q_3 = V/t_p = 0,2 \text{ m/s}^2$, $C_c = 10 \text{ kN/m}$:
 $v_{n,2}$ – vibration displacement, $v_{n,3}$ – vibration velocity, $v_{n,4}$ – vibration acceleration

Выводы

1. Анализируя полученные расчетные данные, можно заключить, что определяющее влияние на уровень вибровоздействий на оператора ВМП в режимах разгона оказывает форсирование пускового режима.

2. С увеличением жесткости сиденья перемещения оператора в режимах разгона уменьшается (см. табл. 1, 3), в режимах стопорения незначи-

тельно. Для нормальных условий работы оператора необходимо рекомендовать в режимах разгона не превышать ускорение более $0,2 \dots 0,4 \text{ м/с}^2$.

3. Уровень динамической нагрузки в режимах разгона динамической системы и стопорения при увеличении жесткости сиденья возрастает соответственно в 1,8–1,9 раза и 2,0.

4. Разработанная модель системы «Оператор – ВПМ – предмет труда – дерево» позволяет определить на стадии разработки конструкции машины вибрационное воздействие на оператора в режимах разгона при трогании с места и стопорения при технологических переездах с погрешностью не более 6...8%.

Библиографический список

Александров В.А., Александров А.В. Вибронагруженность оператора валочно-пакетирующих машин. СПб.: СПбГЛТУ, 2017. 317 с.

References

Aleksandrov V.A., Aleksandrov A.V. Vibronagruzhennost operatora valochno-paketiruyushchikh mashin. SPb.: SPbGLTU. 2017. 317 p. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 31.01.2022

Александров В.А., Александров А.В., Бучников А.А. Вибронагруженность оператора валочно-пакетирующей машины при технологических переездах // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2022. Вып. 239. С. 151–160. DOI: 10.21266/2079-4304.2022.239.151-160

Разработана динамическая модель системы «Оператор – ВПМ -предмет труда – дерево». Математическое описание составлено в форме уравнения Лагранжа 2-го рода. Система уравнений решена относительно упругой деформации спинки сидения оператора методом Рунге-Кутты, с помощью среды программирования MathCAD. Апробация модели осуществлена на примере серийно выпускаемых валочно-пакетирующих машин ЛПИ-19А.

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

Aleksandrov V.A., Aleksandrov A.V., Buchnikov A.A. Vibration load of feller-buncher machine operator during technological transfers. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoy Akademii*, 2022, iss. 239, pp. 151–160 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2022.239.151-160

A dynamic model of the system «operator-feller-buncher machine-object of labor-tree» has been developed. The mathematical description is in the form of the Lagrange

equation of the second kind. The system of equations is solved for the elastic deformation of the operator's seat back by the Runge–Kutta method, using the MathCAD programming environment. Approbation of the model was carried out on the example of commercially available feller-bunchers machines LP-19A.

Key words: feller-buncher machine, mathematical model, fluctuations, vibration, operator.

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

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

ALEKSANDROV Valentin A. – DSc (Technical), professor, 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, кандидат технических наук.

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

ALEKSANDROV Aleksei V. – PhD (Technical), Associate Professor, St.Petersburg State Forest Technical University.

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

БУЧНИКОВ Александр Андреевич – аспирант Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета.

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

BUCHNIKOV Aleksandr A. – PhD student, St.Petersburg State Forest Technical University.

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