

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

ВИБРОНАГРУЖЕННОСТЬ ОПЕРАТОРА ВАЛОЧНО-ПАКЕТИРУЮЩЕЙ МАШИНЫ В ПРОЦЕССЕ ПОДТРЕЛЕВКИ ПАЧКИ ДЕРЕВЬЕВ

В процессе работы валочно-пакетирующей машины срезанные деревья укладываются в пачки, которые затем подбираются трелёвочными тракторами подборщиками для дальнейшей транспортировки их к пункту погрузки на лесовозы. С этой целью позади ВПМ устанавливают прицепы, на которые и укладываются предварительно срезанные деревья [Александров и др., 2017].

На рис. 1 приведена расчетная схема динамической системы «Оператор – валочно-пакетирующая машина – пачка деревьев».

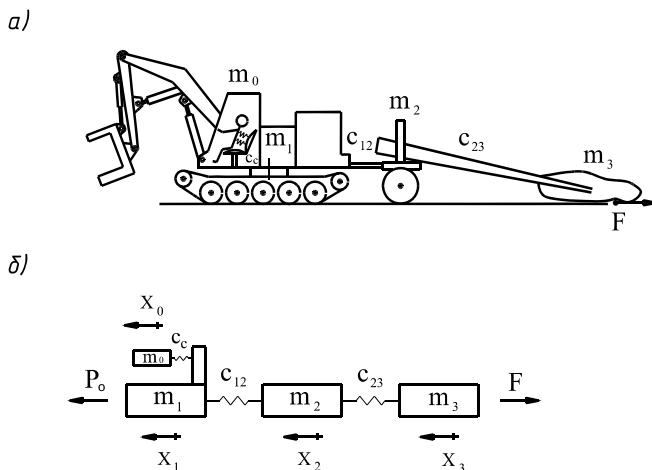


Рис. 1. Расчетная схема динамической системы
«Оператор – валочно-пакетирующая машина – пачка деревьев»:
а – исходная, б – эквивалентная

Fig. 1. Calculation scheme of the dynamic system
«Operator – feller-buncher – pile of trees»:
а – basic, б – equivalent

Принятые обозначения:

m_1, m_2, m_3, m_0 – приведенные массы соответственно ВПМ, коника и комлевой части пачки деревьев, волочащейся части пачки и оператора;

X_1, X_2, X_3, X_0 – обобщенные координаты центров приведенных масс соответственно m_1, m_2, m_3, m_0 ;

c_{12}, c_{23}, c_c – приведенные жесткости соответственно соединения коника с рамой ВПМ, пачки деревьев и спинки сиденья;

P_0 – касательная сила тяги;

F – сопротивление волочащейся части пачки деревьев.

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:

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

Домножим уравнение (1) системы (1) на m_1 , уравнение (2) на m_0 , уравнение (3) на m_3 , уравнение (4) на m_2 и вычтем из первых вторые, то есть:

$$\begin{aligned} -m_1m_0(\ddot{X}_1 - \ddot{X}_0) + m_1C_cX_0 - m_0C_c(X_1 - X_0) - m_0C_{12}(X_1 - X_2) &= m_1C_cX_1 - P_0m_0 \\ \text{или} \\ m_0m_1(\ddot{X}_1 - \ddot{X}_0) + (m_1 + m_0)C_c(X_1 - X_0) + m_0C_{12}(X_1 - X_2) &= m_0P_0; \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} m_2m_3(\ddot{X}_2 - \ddot{X}_3) + m_3C_{23}(X_2 - X_3) - m_2F &= m_3C_{12}(X_1 - X_2) - C_{23}m_2(X_2 - X_3) \\ \text{или} \\ m_3m_2(\ddot{X}_2 - \ddot{X}_3) + (m_2 + m_3)C_{23}(X_2 - X_3) - m_3C_{12}(X_1 - X_2) &= m_2F. \end{aligned} \quad (3)$$

Далее, домножим уравнение (2) системы (1) на m_2 , уравнение (3) на m_1 и вычтем из первого второе:

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

Выразим из уравнения (4) $(X_2 - X_3)$ и $(\ddot{X}_2 - \ddot{X}_3)$:

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

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

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

$$\begin{aligned} & \frac{m_3 m_2^2}{C_{23}} (X_1^{IV} - X_2^{IV}) + \frac{m_3 m_2^2 C_c}{m_1 C_{23}} (\ddot{X}_1 - \ddot{X}_0) + \frac{m_3 m_2 (m_1 + m_2) C_{12}}{m_1 C_{23}} (\ddot{X}_1 - \ddot{X}_2) + \\ & + \frac{(m_2 + m_3) C_{23} m_2}{m_1 C_{23}} (\ddot{X}_1 - \ddot{X}_2) + \frac{(m_2 + m_3) C_{23} m_2 C_c}{m_1 C_{23}} (X_1 - X_0) + \\ & + \frac{(m_2 + m_3) C_{23} (m_1 + m_2) C_{12}}{m_1 C_{23}} (X_1 - X_2) - \frac{(m_2 + m_3) C_{23} m_2 P_0}{m_1 C_{23}} - \\ & - m_3 C_{12} (X_1 - X_2) = m_2 F. \end{aligned}$$

Преобразуя, получим:

$$\begin{aligned} & \frac{m_3 m_2^2}{C_{23}} (X_1^{IV} - X_2^{IV}) + \frac{m_3 m_2^2 C_c}{m_1 C_{23}} (\ddot{X}_1 - \ddot{X}_0) + \\ & + \left[\frac{m_3 m_2 (m_1 + m_2) C_{12} + (m_2 + m_3) C_{23} m_1 m_2}{m_1 C_{23}} \right] (\ddot{X}_1 - \ddot{X}_2) + \\ & + \frac{(m_2 + m_3) m_2 C_c}{m_1} (X_1 - X_0) + \left[\frac{(m_2 + m_3) (m_1 + m_2) C_{12} - m_3 C_{12} m_1}{m_1} \right] \times \\ & \times (X_1 - X_2) = m_2 F + \frac{(m_2 + m_3) m_2 P_0}{m_1}. \end{aligned} \quad (5)$$

Из уравнения (2) выразим $(X_1 - X_2)$ и производные $(\ddot{X}_1 - \ddot{X}_2)$, $(X_1^{IV} - X_2^{IV})$:

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

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

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

Значения для $(X_1 - X_2)$, $(\ddot{X}_1 - \ddot{X}_2)$ и $(X_1^{IV} - X_2^{IV})$ подставим в уравнение (5) и преобразуем:

$$\begin{aligned}
 & -\frac{m_3 m_2^2 m_1}{C_{23} C_{12}} (X_1^{VI} - X_0^{VI}) + \frac{m_3 m_2^2 C_c (m_0 + m_1) C_c}{m_0 C_{12} C_{23}} (X_1^{IV} - X_0^{IV}) + \frac{m_3 m_2^2 C_c}{m_1 C_{23}} \times \\
 & \times (\ddot{X}_1 - \ddot{X}_0) - \left[\frac{m_2 m_3 (m_1 + m_2) C_{12} + (m_2 + m_3) C_{23} m_1 m_2}{m_1 C_{23}} \right] \frac{m_1}{C_{12}} (X_1^{IV} - X_0^{IV}) - \\
 & - \left[\frac{m_2 m_3 (m_1 + m_2) C_{12} + (m_2 + m_3) C_{23} m_1 m_2}{m_1 C_{23}} \right] \frac{(m_0 + m_1) C_c}{m_0 C_{12}} (\ddot{X}_1 - \ddot{X}_0) + \\
 & + \frac{(m_2 + m_3) m_2 C_c}{m_1} (X_1 - X_0) - \left[\frac{(m_2 + m_3)(m_1 + m_2) C_{12} - m_3 C_{12} m_1}{m_1} \right] \frac{m_1}{C_{12}} \times \\
 & \times (\ddot{X}_1 - \ddot{X}_0) - \left[\frac{(m_2 + m_3)(m_1 + m_2) C_{12} - m_3 C_{12} m_1}{m_1} \right] \frac{(m_0 + m_1) C_c}{m_0 C_{12}} (X_1 - X_0) + \\
 & + \left[\frac{(m_2 + m_3)(m_1 + m_2) C_{12} - m_3 C_{12} m_1}{m_1} \right] \frac{P_0}{C_{12}} = m_2 F + \frac{(m_2 + m_3) m_2 P_0}{m_1}.
 \end{aligned} \tag{6}$$

Итак, окончательно получим:

$$-(X_1^{VI} - X_0^{VI}) - A(X_1^{IV} - X_0^{IV}) - B(\ddot{X}_1 - \ddot{X}_0) - C(X_1 - X_0) = D, \tag{7}$$

где

$$\begin{aligned}
 A &= \left\{ \frac{m_2^2 m_3 (m_0 + m_1) C_c + [m_2 m_3 (m_1 + m_2) C_{12} + (m_2 + m_3) C_{23} m_1 m_2] m_0}{m_0 C_{12} C_{23}} \right\} \times \\
 & \quad \times \frac{C_{12} C_{23}}{m_2^2 m_3 m_1}, 1/c^2; \\
 B &= \left\{ \frac{[m_2 m_3 (m_1 + m_2) C_{12} + (m_2 + m_3) m_2 m_1 C_{23}] (m_0 + m_1) C_c}{m_0 C_{12} C_{23}} \right. \\
 & \quad \left. - \frac{m_2^2 m_3 C_c m_0 C_{12} + [(m_2 + m_3)(m_1 + m_2) C_{12} - m_3 C_{12} m_1] m_1 C_{23} m_0}{m_1 C_{23} m_0 C_{12}} \right\} \times \\
 & \quad \times \frac{C_{23} C_{12}}{m_2^2 m_3 m_1}, \frac{1}{c^4}; \\
 C &= \frac{\{(m_0 + m_1) C_c [(m_1 + m_2) C_{12} m_3 - m_3 m_1 C_{12}] - m_2 m_3 C_c m_0 C_{12}\} C_{23}}{m_0 m_1^2 m_2^2 m_3}; \\
 D &= - \left\{ \frac{P_0 [(m_1 + m_2) C_{12} m_3 - m_3 m_1 C_{12}] + m_2 F m_1 C_{12} + m_2 m_3 P_0 C_{12}}{m_1^2 m_2^2 m_3} \right\} C_{23}
 \end{aligned}$$

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

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

$$\theta_1^{IV} + A\theta_1^{IV} + B\theta_1 + C\theta_1 = 0. \quad (8)$$

Решение уравнения (7) запишется как:

$$\theta_1 = (C_1 \cos kt + C_2 \sin kt) + (C_3 \cos nt + C_4 \sin nt) + (C_5 \cos mt + C_6 \sin mt). \quad (9)$$

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

Объем пачки деревьев $V = 5,0 \text{ м}^3$ ($G_D = 45000 \text{ Н}$);

$$m_2 = 2140 \text{ кг}; \quad m_1 = 25\,000 \text{ кг}; \quad m_0 = 80 \text{ кг};$$

$$m_3 = 2250 \text{ кг}; \quad C_{12} = 420 \text{ кН/м}; \quad C_c = 5 \text{ кН/м}; \quad C_{23} = 2200 \text{ кН/м}$$

$$\vartheta / t_p = 0,2; 0,4; 0,6; 0,8 \text{ м/с}^2;$$

$$\dot{X}_0 = 0,01; 0,02; 0,03; 0,04 \text{ м/с}.$$

1. Определяем коэффициенты дифференциального уравнения (7):

– при $C_c = 5 \text{ кН/м}$:

$$A = 2251,59 \text{ 1/с}^2; \quad B = 3571,82 \cdot 10^2 \text{ 1/с}^4; \quad C = 137164 \cdot 10^2 \text{ 1/с}^6;$$

– при $C_c = 10 \text{ кН/м}$:

$$A = 9457,38 \text{ 1/с}^2; \quad B = 5046,6 \cdot 10^2 \text{ 1/с}^4; \quad C = 20009,3 \cdot 10^2 \text{ 1/с}^6.$$

2. Решая уравнение (7) методом Рунге–Кутты с помощью среды программирования MathCAD при начальных условиях, соответствующих режиму разгона системы:

$$\vartheta / t_p = 0,2; 0,4; 0,6; 0,8 \text{ м/с}^2 \text{ и стопорения: } 0,01; 0,02; 0,03; 0,04 \text{ м/с}.$$

Получены результаты исследований, приведенные в табл. 1–4 и на рис. 2, 3.

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
$X_{01}, \text{ м}$	0,01	0,019	0,029	0,039
$\dot{X}_{01}, \text{ м/с}$	0,089	0,178	0,267	0,355
$\ddot{X}_{01}, \text{ м/с}^2$	0,822	1,644	2,466	3,288
$\theta_{\text{дин}}, \text{ Н}$	50	95	145	195

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 ($C_c = 5$ кН/м)**

Характеристики	$\dot{\theta}_1, \text{ м/с}$			
	0,01	0,02	0,03	0,04
$X_{01}, \text{ м}$	0,005	0,009	0,014	0,018
$\dot{X}_{01}, \text{ м/с}$	0,039	0,078	0,118	0,157
$\ddot{X}_{01}, \text{ м/с}^2$	0,345	0,691	1,036	1,381
$\theta_{\text{дин}}, \text{ Н}$	25	45	70	90

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 ($C_c = 10$ кН/м)**

Характеристики	$\partial/t_p, \text{ м/с}^2$			
	0,2	0,4	0,6	0,8
$X_{01}, \text{ м}$	0,009	0,018	0,027	0,036
$\dot{X}_{01}, \text{ м/с}$	0,041	0,081	0,122	0,163
$\ddot{X}_{01}, \text{ м/с}^2$	0,239	0,479	0,718	0,957
$\theta_{\text{дин}}, \text{ Н}$	90	180	270	360

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 ($C_c = 10$ кН/м)**

Характеристики	$\dot{\theta}_1, \text{ м/с}$			
	0,01	0,02	0,03	0,04
$X_{01}, \text{ м}$	0,005	0,011	0,016	0,022
$\dot{X}_{01}, \text{ м/с}$	0,012	0,024	0,036	0,048
$\ddot{X}_{01}, \text{ м/с}^2$	0,029	0,059	0,088	0,118
$\theta_{\text{дин}}, \text{ Н}$	50	110	160	220

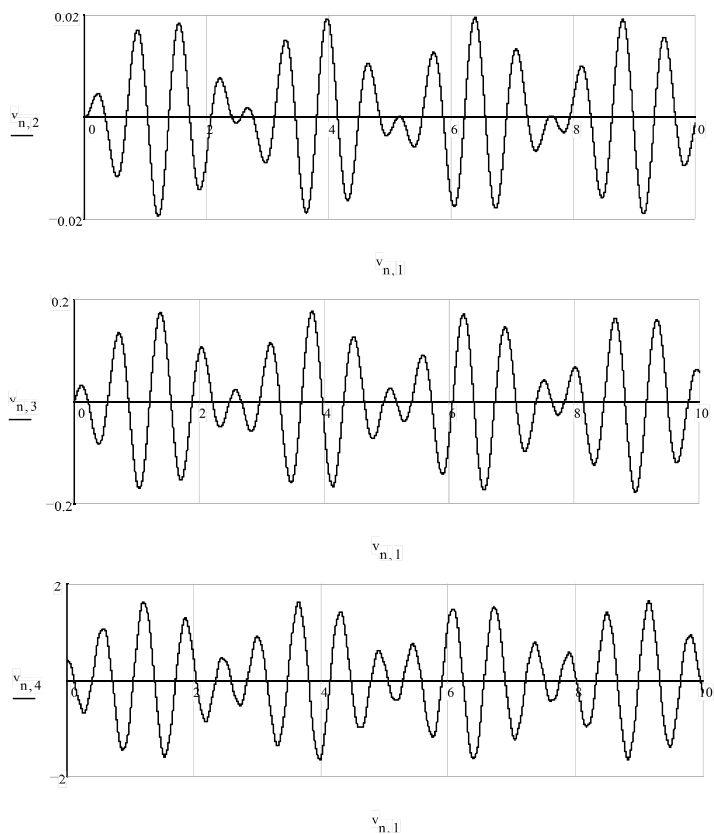


Рис. 2. Графики вибрационного воздействия на оператора ВПМ в режиме разгона при технологическом переезде ($V/t_p = 0,4 \text{ м/с}^2$, $C_c = 5 \text{ кН/м}$):

$v_{n,2}$ – 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 ($V/t_p = 0,4 \text{ m/s}^2$, $C_c = 5 \text{ kN/m}$):

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

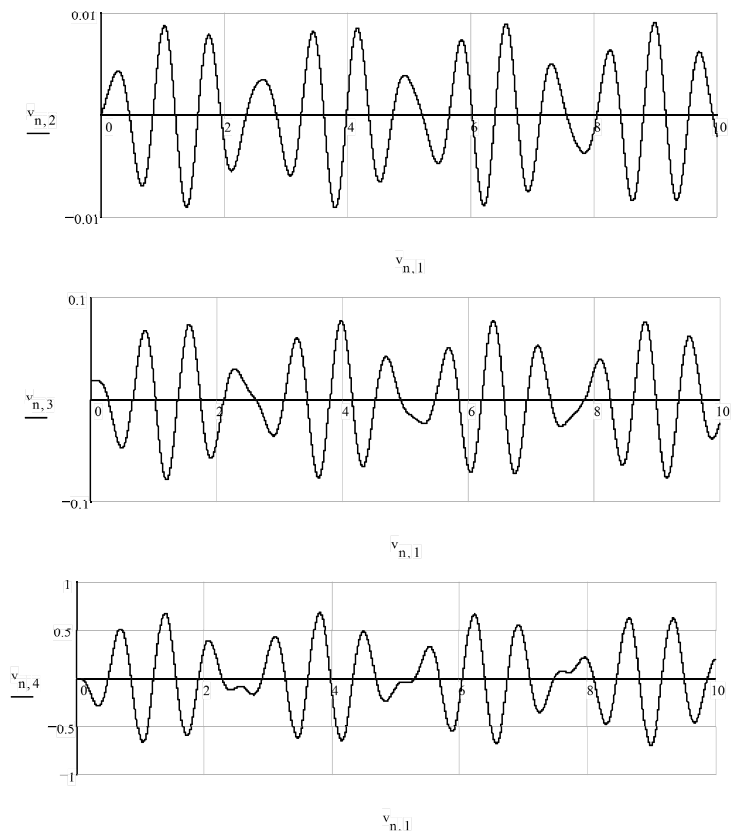


Рис. 3. Графики вибрационного воздействия на оператора ВПМ в режиме стопорения при технологическом переезде ($\dot{Q}_1=0,02 \text{ м/с}^2$, $C_c=5 \text{ кН/м}$):

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

Fig. 3. Graphs of the vibration impact on the operator of feller-buncher in the stopping mode at the process crossing ($\dot{Q}_1=0.02 \text{ м/с}^2$, $C_c=5 \text{ кН/м}$):

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

Выводы

1. В результате исследований установлено, что процессы разгона и стопорения ВПМ сопровождаются высокими значениями виброускорений оператора, превышающие санитарные нормы в 1,5–3,0 раза и более. При

этом уровень воздействия динамических нагрузок на тело оператора также высок. В этой связи в инструкцию по эксплуатации ВПМ необходимо ввести пункт, запрещающий осуществлять разгон динамической системы при ускорениях машины $0,4 \text{ м/с}^2$ и более.

2. С увеличением жесткости спинки сиденья наблюдается некоторое снижение перемещения оператора на сиденье и уменьшение ускорения (см. табл. 3, 4). В тоже время наблюдается значительное увеличение динамической нагрузки на тело человека.

3. Разработанная модель системы «Оператор – ВПМ – предмет труда – пачка деревьев» позволяет определить вибрационное воздействие на оператора на стадии разработки рабочей документации на машину с погрешностью 8–10%.

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 valочно-пакетирующchikh 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 в процессе подтрелевки пачки деревьев // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2022. Вып. 239. С. 141–150. DOI: 10.21266/2079-4304.2022.239.141-150

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 сиденья оператора методом Рунге–Кутта, с помощью среды программирования MathCAD. Апробация модели осуществлена на примере серийно выпускаемых валочно-пакетирующих машин ЛП-19А.

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

Aleksandrov V.A., Aleksandrov A.V., Buchnikov A.A. Vibration loading of a feller-bunchermachine operator in the process of skidding a bunch of trees. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehnicoskoj Akademii*, 2022, iss. 239, pp. 141–150 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2022.239.141-150

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