

## 2. ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ЛЕСОЗАГОТОВОК

---

УДК 634.0.323.13.375

**В.А. Александров, А.В. Александров, Д.Ю. Гомон**

### **ВИБРОНАГРУЖЕННОСТЬ ОПЕРАТОРА ВАЛОЧНО-ТРЕЛЁВОЧНОЙ МАШИНЫ В ПРОЦЕССЕ ОЧИСТКИ ОСНОВАНИЯ ДЕРЕВА ОТ СНЕГА ПОВОРОТОМ РУКОЯТИ**

*Введение.* Как уже отмечалось ранее [1], в зимнее время при глубоком снеге оператору валочно-трелёвочной машины (ВТМ) или валочно-пакетирующей приходится очищать от снега основание подлежащих срезанию деревьев перемещениями захватно-срезающих устройств манипулятором или рукоятью манипулятора. Экспериментальными исследованиями установлено, что этот процесс сопровождается значительными динамическими нагрузками как на базу, так и на оператора.

Рассмотрим вибронагруженность оператора валочно-трелёвочной машины на биодинамической модели.

На рис. 1 представлена расчётная схема биодинамической системы «оператор – ВТМ».

*Методика исследования* – математическое моделирование.

Принятые обозначения:

$J_1, J_2, J_{01}, J_{02}$  – приведенные моменты инерции соответственно корпуса ВТМ, манипулятора с ЗСУ, таза и нижних конечностей, груди с верхними конечностями и головы оператора;

$\varphi_1, \varphi_2, \varphi_{01}, \varphi_{02}$  – угловые перемещения масс с моментами инерции соответственно  $J_1, J_2, J_{01}, J_{02}$ ;

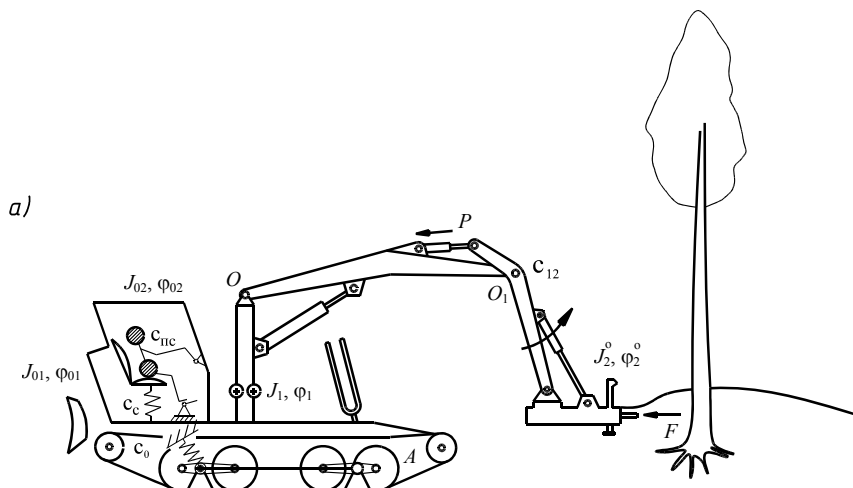
$c_{12}, c_c, c_0, c_{пс}$  – приведенные угловые жёсткости соответственно манипулятора, сиденья, подвески и позвоночного столба;

$P$  – усилие на штоках гидроцилиндров (гидроцилиндра) привода рукояти;

$G$  – сила тяжести корпуса ВТМ;

$M_{c_1}, M_{c_2}$  – соответственно моменты сопротивления повороту корпуса ВТМ и рукояти;

$r$  – плечо силы  $P$ .



б)

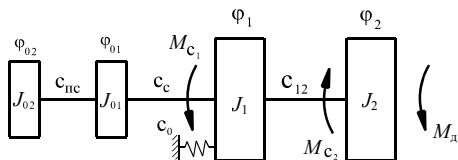


Рис. 1. Расчётные схемы биодинамической системы «оператор – ВТМ»: а – исходная; б – эквивалентная

Fig. 1. Calculation schemes of the biodynamic system «operator – VTM»: а – initial; б – equivalent

Кинетическая энергия системы

$$T = \frac{1}{2} J_1 \dot{\varphi}_1^2 + \frac{1}{2} J_2 \dot{\varphi}_2^2 + \frac{1}{2} J_{01} \dot{\varphi}_{01}^2 + \frac{1}{2} J_{02} \dot{\varphi}_{02}^2.$$

Потенциальная энергия системы

$$\Pi = \frac{1}{2} c_0 \varphi_1^2 + \frac{1}{2} c_{12} (\varphi_2 - \varphi_1)^2 + \frac{1}{2} c_c (\varphi_1 - \varphi_{01})^2 + \frac{1}{2} c_{nc} (\varphi_{01} - \varphi_{02})^2.$$

Произведя действия в соответствии с уравнением Лагранжа 2-го рода, получим следующую систему уравнений:

$$\begin{matrix} J_1 & \begin{vmatrix} -J_{02} \\ J_{01} \end{vmatrix} \\ -J_{01} & \begin{vmatrix} J_{01} \\ J_2 \end{vmatrix} \\ & \begin{vmatrix} J_1 \\ J_2 \end{vmatrix} \end{matrix} \begin{vmatrix} J_{01} \ddot{\varphi}_{01} + c_{nc} (\varphi_{01} - \varphi_{02}) = c_c (\varphi_1 - \varphi_{01}), \\ J_{02} \ddot{\varphi}_{02} = c_{nc} (\varphi_{01} - \varphi_{02}), \\ J_1 \ddot{\varphi}_1 + c_0 \varphi_1 + c_c (\varphi_1 - \varphi_{01}) = c_{12} (\varphi_2 - \varphi_1) - M_{c_1}, \\ J_2 \ddot{\varphi}_2 + c_{12} (\varphi_2 - \varphi_1) = M_{д} - M_{c_2}. \end{vmatrix} \quad (1)$$

Умножим первое уравнение системы (1) на  $J_{02}$ , второе – на  $J_{01}$ , третье – на  $J_2$ , четвертое – на  $J_1$  и, вычитая из первых вторые, получим:

$$\begin{aligned} J_{01}J_{02}(\ddot{\varphi}_{01} - \ddot{\varphi}_{02}) + (J_{01} + J_{02})c_{nc}(\varphi_{01} - \varphi_{02}) &= J_{02}c_c(\varphi_1 - \varphi_{01}). \\ -J_1J_2(\ddot{\varphi}_2 - \ddot{\varphi}_1) + J_2c_0\varphi_1 + J_2c_c(\varphi_1 - \varphi_{01}) - (J_1 + J_2)c_{12}(\varphi_2 - \varphi_1) &= \\ &= J_1M_{c_2} - J_2M_{c_1} - J_1M_d. \end{aligned} \quad (2)$$

Используя допущение  $c_0\varphi_1 \approx M_d$ , имеем:

$$\begin{aligned} -J_1J_2(\ddot{\varphi}_2 - \ddot{\varphi}_1) + (J_1 + J_2)M_d - J_2c_c(\varphi_1 - \varphi_{01}) - (J_1 + J_2)c_{12}(\varphi_2 - \varphi_1) &= \\ &= J_1M_{c_2} - J_2M_{c_1}. \end{aligned} \quad (3)$$

Умножим первое уравнение системы (1) на  $J_1$ , третье – на  $J_{01}$  и, вычитая из первого третье, получим:

$$\begin{aligned} -J_1J_{01}(\ddot{\varphi}_1 - \ddot{\varphi}_{01}) + J_1c_{nc}(\varphi_{01} - \varphi_{02}) - J_{01}c_0\varphi_1 - (J_{01} + J_1)c_c(\varphi_1 - \varphi_{01}) - \\ -J_{01}M_{c_1} = -J_{01}c_{12}(\varphi_2 - \varphi_1). \end{aligned} \quad (4)$$

Преобразуя полученные уравнения, получим дифференциальное уравнение

$$\Theta_1^{VI} + A\Theta_1^{IV} + B\ddot{\Theta}_1 + C\Theta_1 = 0, \quad (5)$$

где

$$\begin{aligned} A &= \frac{J_1^2J_2(J_{01} + J_{02})c_{nc} + J_1J_2(J_{01} + J_1)c_cJ_{02} - (J_1 + J_2)c_{12}J_1J_{01}J_{02}}{J_{01}J_{02}J_1^2J_2}; \\ B &= \frac{J_1J_2(J_{01} + J_1)c_c(J_{01} + J_{02})c_{nc} - J_1^2J_2c_{nc}J_{02}c_c - J_2c_cJ_{01}^2J_{02}c_{12} - \dots}{J_{01}^2J_{02}J_1^2J_2}; \\ &\dots \frac{-(J_1 + J_2)c_{12}J_1(J_{01} + J_{02})c_{nc}J_{01} + (J_{01} + J_1)c_c(J_1 + J_2)c_{12}J_{01}J_{02}}{J_{01}^2J_{02}J_1^2J_2}; \\ C &= \frac{J_2c_c(J_{01} + J_{02})c_{nc}J_{01}c_{12} + J_1c_{nc}(J_1 + J_2)c_{12}J_{02}c_c - \dots}{J_{01}^2J_{02}J_1^2J_2}. \\ &\dots \frac{-(J_{01} + J_1)c_c(J_1 + J_2)c_{12}(J_{01} + J_{02})c_{nc}}{J_{01}^2J_{02}J_1^2J_2}. \end{aligned}$$

*Результаты исследования.*

Рассмотрим пример применительно к ВТМ ЛПИ-17А.

Исходные данные:

$$\begin{aligned} f_n &= 122,65 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2; \quad r = 0,5 \text{ м}; \quad c_0 = 4,287 \cdot 10^6 \text{ Н} \cdot \text{м}; \quad J_1 = 1,22 \cdot 10^4 \text{ кг} \cdot \text{м}^2; \\ c_{12} &= 2,949 \cdot 10^6 \text{ Н} \cdot \text{м}; \quad i_n = 3; \quad c_c = 15,31 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м}; \quad b = 0,0003 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с} \cdot \text{Н}; \\ c &= 0,00035 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{Н}; \quad J_2 = 66 \text{ 248 кг} \cdot \text{м}^2; \quad J_{01} = 70,38 \text{ кг} \cdot \text{м}^2; \\ J_{02} &= 131,58 \text{ кг} \cdot \text{м}^2; \quad c_{nc} = 2,97 \cdot 10^5 \text{ Н} \cdot \text{м}. \end{aligned}$$

1. Определяем коэффициенты дифференциального уравнения (5):

$$A = 6493,41; \quad B = 24044,3 \cdot 10^{-2}; \quad C = 140 \text{ 822,2} \cdot 10^3.$$

2. Решаем уравнение (5) методом Рунге–Кутты с помощью среды программирования MathCAD при начальных условиях, соответствующих: режиму разгона системы –

$$\Theta_1 = \dot{\Theta}_1 = \ddot{\Theta}_1 = \Theta_1^{IV} = \Theta_1^V = 0, \quad \ddot{\Theta}_1 = 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6 \text{ рад/с}^2;$$

режиму стопорения –

$$\Theta_1 = \ddot{\Theta}_1 = \ddot{\Theta}_1 = \Theta_1^{IV} = \Theta_1^V = 0, \quad \dot{\Theta}_1 = 0,01; 0,02; 0,03; 0,04; 0,05 \text{ рад/с.}$$

На рис. 2 и 3 приведены графики вибрационного воздействия на оператора, а в табл. 1, 2 – результаты расчётов.

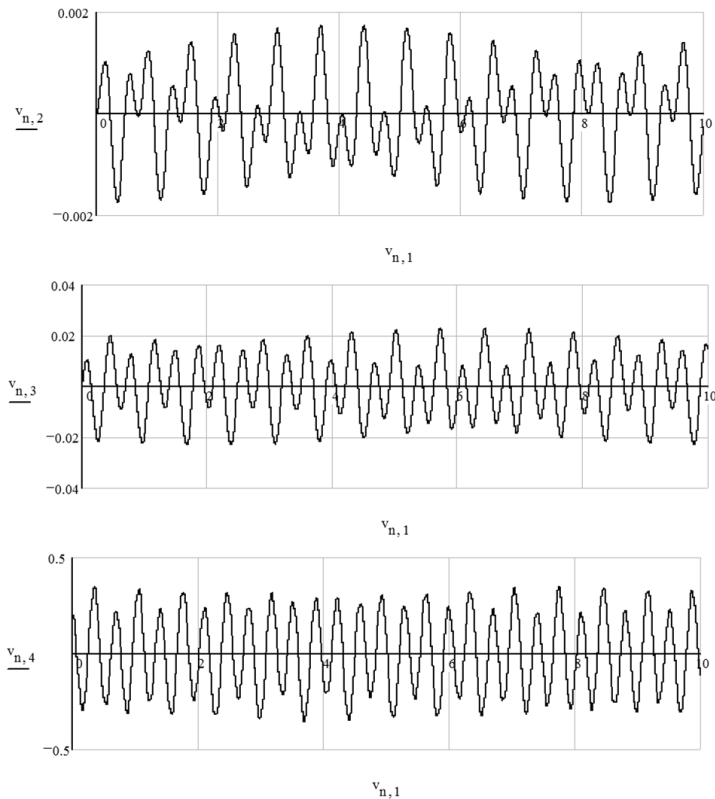


Рис. 2. Графики вибрационного воздействия на оператора ВТМ в режиме разгона ( $\ddot{\Theta}_1 = 0,2 \text{ рад/с}^2$ ):  $v_{n,2}$  – виброперемещение;  $v_{n,3}$  – виброскорость;  $v_{n,4}$  – виброускорение

Fig. 2. Graphs of the vibration effect on the TMV operator in the acceleration mode ( $\ddot{\Theta}_1 = 0.2 \text{ rad/s}^2$ ):  $v_{n,2}$  – vibration displacement;  $v_{n,3}$  – vibration velocity;  $v_{n,4}$  – vibration acceleration

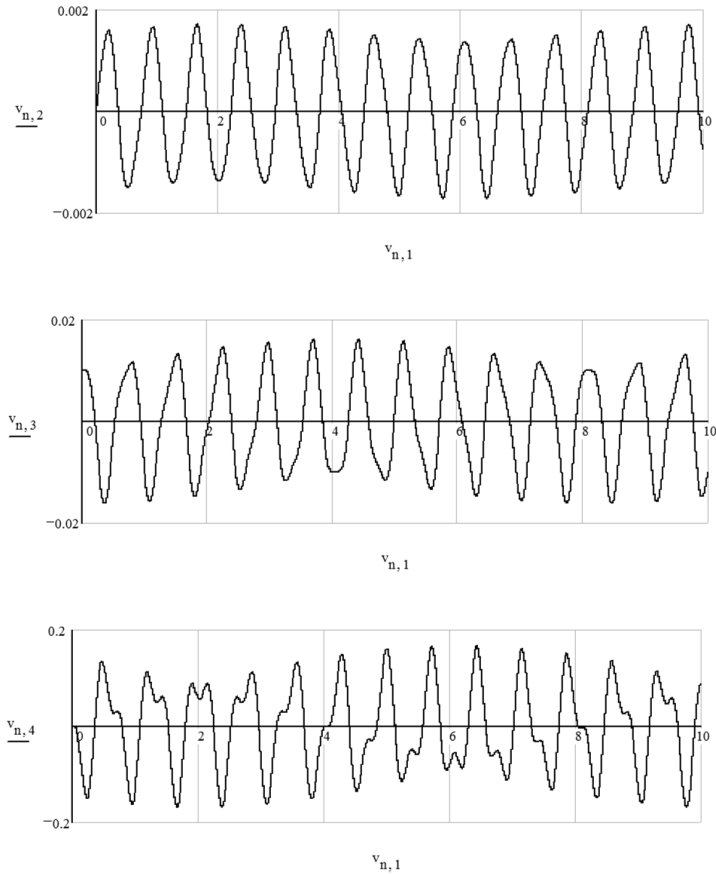


Рис. 3. Графики вибрационного воздействия на оператора ВТМ в режиме стопорения ( $\dot{\Theta}_1 = 0,01$  рад/с):  $v_{n,2}$  – виброперемещение;  $v_{n,3}$  – виброскорость;  $v_{n,4}$  – виброускорение

Fig. 3. Vibration impact graphs on the TMM operator in the locking mode ( $\dot{\Theta}_1 = 0,01$  rad/s):  $v_{n,2}$  – vibration displacement;  $v_{n,3}$  – vibration velocity;  $v_{n,4}$  – vibration acceleration

Таблица 1

**Характеристики вибрационного воздействия на оператора ВТМ  
в режиме разгона**

**Characteristics of the vibration effect on the operator VTM acceleration mode**

Характеристики	$\ddot{\Theta}_1$ , рад/с <sup>2</sup>				
	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
$\Theta_1$ , рад	0,0017	0,0026	0,0035	0,0043	0,0052
$z_{01}$ , см	0,425	0,650	0,875	1,075	1,300
$z_{02}$ , см	0,459	0,702	0,945	1,161	1,404
$\dot{\Theta}_1$ , рад/с	0,023	0,034	0,046	0,057	0,069
$\dot{z}_{01}$ , см/с	5,75	8,50	11,50	14,25	17,25
$\dot{z}_{02}$ , см/с	6,21	9,18	12,42	15,39	18,63
$\ddot{\Theta}_1$ , рад/с <sup>2</sup>	0,353	0,529	0,706	0,882	1,059
$\ddot{z}_{01}$ , м/с <sup>2</sup>	0,882	1,322	1,765	2,205	2,640
$\ddot{z}_{02}$ , м/с <sup>2</sup>	0,953	1,428	1,906	2,381	2,859
$\Delta$ , см	0,21	–	–	–	0,64

Таблица 2

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

**Characteristics of vibration impact on the operator of the TMM in the locking mode**

Характеристики	$\dot{\Theta}_1$ , рад/с				
	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05
$\Theta_1$ , рад	0,0017	0,0034	0,0051	0,0068	0,0086
$z_{01}$ , см	0,425	0,850	1,275	1,700	2,150
$z_{02}$ , см	0,459	0,918	1,377	1,836	2,322
$\dot{\Theta}_1$ , рад/с	0,016	0,032	0,049	0,065	0,081
$\dot{z}_{01}$ , см/с	4,00	8,00	12,25	16,25	20,25
$\dot{z}_{02}$ , см/с	4,32	8,64	13,23	17,55	21,87
$\ddot{\Theta}_1$ , рад/с <sup>2</sup>	0,167	0,334	0,501	0,668	0,839
$\ddot{z}_{01}$ , м/с <sup>2</sup>	0,417	0,835	1,252	1,670	2,097
$\ddot{z}_{02}$ , м/с <sup>2</sup>	0,451	0,902	1,353	1,803	2,265
$\Delta$ , см	0,21	–	–	–	1,05

*Вывод.* В результате проведённых исследований установлено, что и в режимах расчистки снега у основания деревьев операторы ВТМ подвержены ускорениям, превышающим нормативные по санитарным нормам СН 2.2.4/2.1.8.566–96 в 4–6 раз. При этом деформация позвоночного столба не превышает 0,5–1,0 см.

### **Библиографический список**

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

### **References**

*Aleksandrov V.A., Aleksandrov A.V.* Vibronagruzhennost' operatorov valochno-paketirujushhii mashin. SPb.: SPbGLTU, 2017. 317 s. (In Russ.)

*Материал поступил в редакцию 26.11.2018 г.*

---

**Александров В.А., Александров А.В., Гомон Д.Ю.** Вибронагруженность оператора валочно-трелёвочной машины в процессе очистки основания дерева от снега поворотом рукояти // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2019. Вып. 226. С. 47–54. DOI: 10.21266/2079-4304.2019.226.47-54

Разработана модель биодинамической системы «оператор – валочно-трелёвочная машина». Математическое описание составлено в форме уравнения Лагранжа 2-го рода. Система уравнений решена относительно деформации упругой связи сидения с корпусом машины методом Рунге–Кутта с помощью среды программирования MathCAD. Апробация модели осуществлена на примере серийно выпускаемых валочно-трелёвочных машин в режиме очистки основания дерева от снега поворотом рукояти. Установлено, что вибронагруженность операторов ВТМ превышает санитарные нормы в 4–6 раз.

**Ключевые слова:** валочно-пакетирующая машина, математическая модель, вибрация, сиденье.

**Aleksandrov V.A., Aleksandrov A.V., Gomon D.Yu.** Vibrating load of the operator of the feller-buncher in the process of cleaning the base of the tree from snow by turning the handle. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehneskoj Akademii*, 2019, is. 226, pp. 47–54 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2019.226.47-54

In article the model of biodynamic system is developed «the operator – feller – the packaging car (feller – buncher machine)». 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 suspension seats of the operator by a method of Runge–Kutta, by MathCAD. Model approbation is carried out on an example of serially let out feller-buncher LP-17A in the dispersal mode at start-off from the place. As a result of researches it is established: vibroloading operators of feller-packaging cars exceeds the sanitary code in 4–6 times.

**Key words:** feller buncher, mathematical models, vibration, seat.

---

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

**ГОМОН Денис Юрьевич** – соискатель учёной степени кандидата технических наук Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова.

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

**GOMON Denis Yu.** – PhD student, St.Petersburg State Forest Technical University.

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