

## 2. ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ЛЕСОЗАГОТОВОК

УДК 630\*32

В.А. Александров, Д.Ю. Гомон

### ВИБРОНАГРУЖЕННОСТЬ ОПЕРАТОРА ВАЛОЧНО-ТРЕЛЁВОЧНОЙ МАШИНЫ В ПРОЦЕССЕ НАВЕДЕНИЯ ЗАХВАТНО-СРЕЗАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА НА ДЕРЕВО

*Введение.* Предыдущими исследованиями [Александров, 1984] установлено, что значительные динамические нагрузки и вибровоздействие на оператора ВТМ действуют не только, когда манипулятор нагружен пакетируемым деревом, но и в моменты наведения ЗСУ на дерево вследствие большой его массы. В связи с этим этот процесс представляет интерес с позиции выявления вибронагруженности оператора валочно-трелёвочной машины.

На рис. 1 представлена расчетная схема динамической системы «Оператор – ВТМ – предмет труда – дерево».

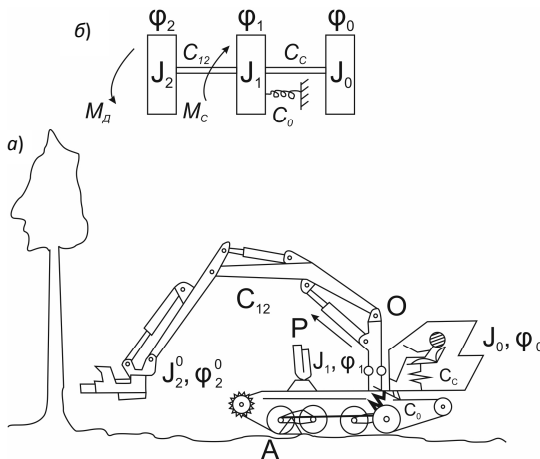


Рис. 1. Расчетные схемы динамической системы «Оператор – ВТМ – предмет труда – дерево»: а – исходная, б – эквивалентная

Fig. 1. Calculation schemes of the dynamic system «Operator – Feller-skidding machine – subject of work – tree»: a – the original, b – equivalent

*Методика исследования – математическое моделирование.*

Принятые обозначения:

$I_1, I_2, I_0$  – приведенные моменты инерции соответственно валочно-стрелёвочной машины (корпуса), манипулятора с ЗСУ и оператора;

$\varphi_1, \varphi_2, \varphi_0$  – обобщенные координаты масс соответственно с моментом инерции  $I_1, I_2, I_0$ ;

$C_0, C_{12}, C_C$  – соответственно приведенные угловые жесткости подвески передних кареток, манипулятора и сидения;

$P$  – усилие на штоках гидроцилиндров привода стрелы;

$M_D$  – крутящий момент;

$r$  – плечо силы  $P$ .

Кинетическая энергия системы:

$$T = \frac{1}{2} I_1 \dot{\varphi}_1^2 + \frac{1}{2} I_2 \dot{\varphi}_2^2 + \frac{1}{2} I_0 \dot{\varphi}_0^2.$$

Потенциальная энергия системы:

$$\Pi = \frac{1}{2} C_{12} (\varphi_2 - \varphi_1)^2 + \frac{1}{2} C_C (\varphi_1 - \varphi_0)^2 + \frac{1}{2} C_0 \varphi_1^2.$$

В соответствии с уравнением Лагранжа II рода система дифференциальных уравнений:

$$\begin{array}{l} I_0 \ddot{\varphi}_0 + C_C \varphi_0 = C_C \varphi_1, \\ - \frac{I_2}{I_0} \left| \begin{array}{l} I_1 \\ I_0 \end{array} \right| I_1 \ddot{\varphi}_1 + C_C (\varphi_1 - \varphi_0) + C_0 \varphi_1 = C_{12} (\varphi_2 - \varphi_1) - M_C, \\ I_2 \ddot{\varphi}_2 + C_{12} (\varphi_2 - \varphi_1) = M_D. \end{array} \quad (1)$$

Умножим уравнение (1) системы (1) на  $I_1$ , уравнение (2) на  $I_0$  и вычтем из первого второе:

$$\begin{aligned} -I_0 I_1 (\ddot{\varphi}_1 - \ddot{\varphi}_0) + I_1 C_C \varphi_0 - I_0 C_C (\varphi_1 - \varphi_0) - I_0 C_0 \varphi_1 = \\ = I_1 C_C \varphi_1 - I_0 C_{12} (\varphi_2 - \varphi_1) + I_0 M_C, \end{aligned}$$

или преобразуя, получим:

$$\begin{aligned} -I_0 I_1 (\ddot{\varphi}_1 - \ddot{\varphi}_0) + I_1 C_C (\varphi_1 - \varphi_0) - I_0 C_C (\varphi_1 - \varphi_0) - I_0 C_0 \varphi_1 = \\ = -I_0 C_{12} (\varphi_2 - \varphi_1) + I_0 M_C. \end{aligned} \quad (2)$$

Далее умножим уравнение (2) системы (1) на  $I_2$ , уравнение (3) на  $I_1$  и вычтем из первого второе и преобразуем:

$$\begin{aligned} -I_1 I_2 (\ddot{\phi}_2 - \ddot{\phi}_1) + I_2 C_C (\phi_1 - \phi_0) + I_2 C_0 \phi_1 - (I_1 + I_2) C_{12} (\phi_2 - \phi_1) = \\ = -I_1 M_D - I_2 M_C. \end{aligned} \quad (3)$$

Для дальнейших преобразований используем два допущения:

$$C_0 \phi_1 \approx C_{12} (\phi_2 - \phi_1),$$

$$C_0 \phi_1 \approx M_D.$$

Продифференцируем уравнение (3) по  $t$  и подставим вместо  $\dot{\phi}_1$  выражение [2]:

$$\dot{\phi}_1 = \frac{\left[ a - \frac{b C_{12}}{f n r} (\phi_2 - \phi_1) - \frac{C C_{12}}{f n r} (\dot{\phi}_2 - \dot{\phi}_1) \right]}{r}.$$

Здесь обозначено

$$a = \frac{q_n n}{60 f n} \eta'_n \eta'_u; \quad b = \frac{q_n n}{60 f n} (K_n \eta'_u + K_u \eta'_n) p; \quad C = \frac{K_v}{f_n} \eta'_u,$$

где  $q_n$  – объемная постоянная насоса;  $n$  – число оборотов гидронасоса;  $f_n$  – площадь поршня (поршней) гидроцилиндров в приводе стрелы;  $p$  – давление в гидросистеме;  $\eta'_n \eta'_u$  – КПД насоса с распределителем и гидроцилиндра;  $K_n, K_u, K_v$  – коэффициенты пропорциональности.

$$\begin{aligned} -I_1 I_2 (\ddot{\phi}_2 - \ddot{\phi}_1) + I_2 C_C (\dot{\phi}_1 - \dot{\phi}_0) + I_2 C_0 \dot{\phi}_1 - (I_1 + I_2) C_{12} (\dot{\phi}_2 - \dot{\phi}_1) = 0. \\ -I_1 I_2 (\ddot{\phi}_2 - \ddot{\phi}_1) + I_2 C_C (\dot{\phi}_1 - \dot{\phi}_0) + \frac{I_2 C_0 a}{r} - \frac{I_2 C_0 b C_{12}}{f n r^2} (\phi_2 - \phi_1) - \\ - \frac{I_2 C_0 C C_{12}}{f n r^2} (\dot{\phi}_2 - \dot{\phi}_1) - (I_1 + I_2) C_{12} (\dot{\phi}_2 - \dot{\phi}_1) = 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Преобразуем уравнение (2) с учетом допущения

$$C_0 \phi_1 \approx M_D$$

$$-I_0 I_1 (\ddot{\phi}_1 - \ddot{\phi}_0) - (I_1 + I_0) C_C (\phi_1 - \phi_0) - I_0 M_D = -I_0 C_{12} (\phi_2 - \phi_1) + I_0 M_C. \quad (5)$$

Из полученного уравнения (5) выразим  $(\varphi_2 - \varphi_1) \dots (\ddot{\varphi}_2 - \ddot{\varphi}_1)$  и подставляя в уравнение (4), окончательно получим:

$$(\varphi_1^V - \varphi_0^V) + A(\ddot{\varphi}_1 - \ddot{\varphi}_0) + B(\ddot{\varphi}_1 - \ddot{\varphi}_0) + C(\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_0) + D(\varphi_1 - \varphi_0) = E, \quad (6)$$

где

$$A = \left[ \frac{I_2(I_1 + I_0)C_C fnr^2 + I_2 C_0 C C_{12} I_0 + (I_1 + I_2) C_{12} fnr^2 I_0}{I_0 fnr^2 I_1 I_2} \right], 1/c^2;$$

$$B = \frac{C_0 b C_{12}}{fnr^2 I_1}, 1/c^3;$$

$$C = \left[ \frac{I_2 C_0 C C_{12} (I_1 + I_0) C_C + (I_1 + I_2) C_{12} (I_1 + I_0) fnr^2 C_C - I_2 C_C fnr^2 I_0 C_{12}}{fnr^2 I_0 I_1^2 I_2} \right], 1/c^4;$$

$$D = \left[ \frac{C_0 b C_{12} (I_1 + I_0) C_C}{fnr^2 I_0 I_1^2} \right], 1/c^5;$$

$$E = \left[ \frac{C_0 arfn I_0 C_{12} - C_0 b C_{12} I_0 M_D - C_0 b C_{12} I_0 M_C}{fnr^2 I_0 I_1^2} \right], 1/c^5.$$

*Результаты исследований.* Рассмотрим пример с исходными данными, применительно к ВТМ ЛП-17А.

Исходные данные:

$$L = 5 \text{ м}; \quad r = 0,5 \text{ м}; \quad f_n = 245,3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2; \quad C_0 = 4,287 \cdot 10^6 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$I_1 = 3,2 \cdot 10^4 \text{ кгм}^2; \quad C_{12} = 6,52 \cdot 10^7 \text{ Н} \cdot \text{м}; \quad C_C = 15,31 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$b = 0,029 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с} \cdot \text{Н}; \quad C = 0,00035 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{Н};$$

$$I_2^0 = 22675 \text{ кгм}^2; \quad i_n = 3; \quad I_2 = 2,04 \cdot 10^5 \text{ кгм}^2; \quad I_0 = 5,53 \cdot 10^2 \text{ кгм}^2.$$

1. Определяем коэффициенты дифференциального уравнения (6):

$$A = 4877,12; \quad B = 413,05 \cdot 10^2; \quad C = 1376,12 \cdot 10^2; \quad D = 11623,05 \cdot 10^2.$$

2. Решаем уравнение (6) методом Рунге-Кутты с помощью среды программирования MathCAD при начальных условиях соответствующих режиму разгона системы:

$$\theta_1 = \dot{\theta}_1 = \ddot{\theta}_1 = \theta_1^{IV} = 0, \quad \ddot{\theta}_1 = 0,2; 0,3; 0,4; 0,5 1/c^2;$$

режиму стопорения

$$\theta_1 = \ddot{\theta}_1 = \dot{\theta}_1 = \theta_1^{IV} = 0, \quad \dot{\theta}_1 = 0,1; 0,15; 0,20; 0,25 1/c.$$

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

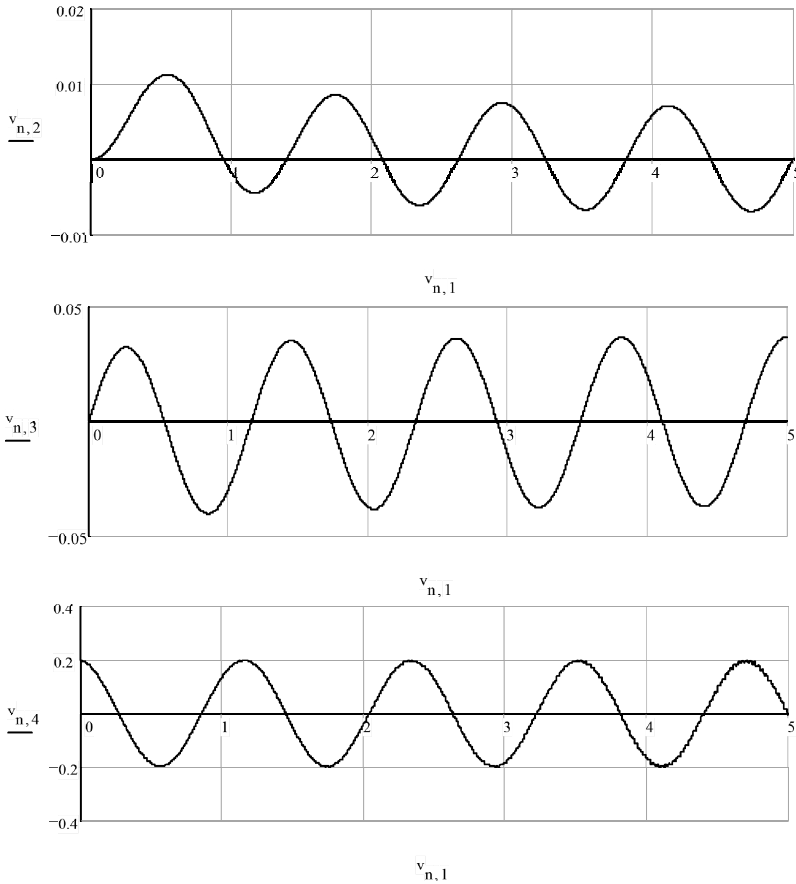


Рис. 2. Графики вибрационного воздействия на оператора в режиме разгона при наведении ЗСУ на дерево ( $\ddot{\theta}_1 = 0,2 \text{ рад/с}^2$ ):  $v_{n,2}$  – виброперемещение;  $v_{n,3}$  – виброскорость;  $v_{n,4}$  – виброускорение

Fig. 2. Graphs of vibration effects on the operator in the mode of acceleration when pointing head on a tree ( $\ddot{\theta}_1 = 0.2 \text{ rad/s}^2$ ):  $v_{n,2}$  – vibration displacement;  $v_{n,3}$  – vibration velocity;  $v_{n,4}$  – vibration acceleration

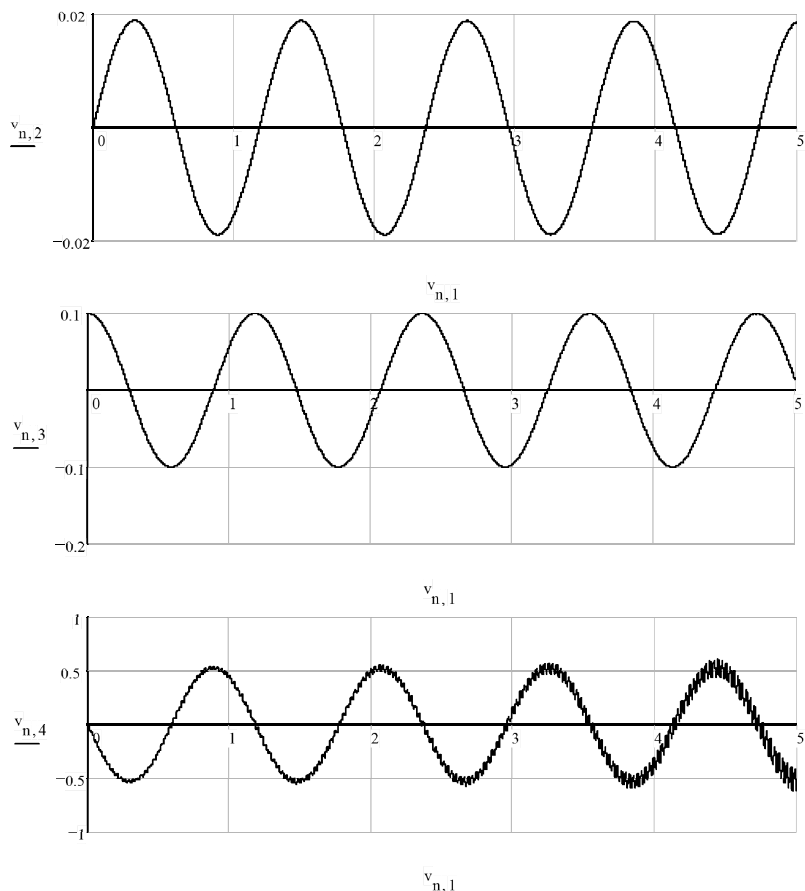


Рис. 3. Графики вибрационного воздействия на оператора в режиме стопорения при наведении ЗСУ на дерево ( $\dot{\theta}_1 = 0,1$  рад/с):  $v_{n,2}$  – виброперемещение;  $v_{n,3}$  – виброскорость;  $v_{n,4}$  – виброускорение

Fig. 3. Graphs of the vibration impact on the operator in the stop mode when you move when pointing head on a tree ( $\dot{\theta}_1 = 0.1$  rad/s):

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

Анализ результатов исследований показывает, что в режимах разгона при наведении ЗСУ ВТМ на дерево оператор подвержен вибровоздействию в 2–3 раза превышающему санитарные нормы, в режимах стопорения это превышение еще больше.

Перемещения оператора на сиденье также значительны.

Таблица 1

**Характеристики вибрационного воздействия на оператора ВТМ  
в режиме наведения ЗСУ на дерево**

**Vibration impact on operator of Feller-skidding machine  
when pointing head on a tree**

Характеристики	$\ddot{\theta}_1$ , рад/с <sup>2</sup>			
	0,2	0,3	0,4	0,5
$\theta_1$ , рад	0,011	0,017	0,023	0,028
$z$ , см	2,9	4,59	6,21	7,56
$\dot{\theta}_1$ , рад/с	0,04	0,06	0,08	0,10
$\dot{z}$ , м/с	0,108	0,162	0,216	0,270
$\ddot{\theta}_1$ , рад/с <sup>2</sup>	0,20	0,36	0,40	0,50
$\ddot{z}$ , м/с <sup>2</sup>	0,540	0,972	1,08	1,35

Таблица 2

**Характеристики вибрационного воздействия на оператора ВТМ  
в режиме стопорения при наведении ЗСУ на дерево**

**Vibration impact on operator of Feller-skidding machine in the stop mode  
when pointing head on a tree**

Характеристики	$\dot{\theta}_1$ , рад/с			
	0,1	0,15	0,20	0,25
$\theta_1$ , рад	0,019	0,028	0,038	0,047
$z$ , см	5,13	7,56	10,26	12,69
$\dot{\theta}_1$ , рад/с	0,1	0,15	0,2	0,25
$\dot{z}$ , м/с	0,270	0,405	0,54	0,675
$\ddot{\theta}_1$ , рад/с <sup>2</sup>	0,617	0,926	1,234	1,543
$\ddot{z}$ , м/с <sup>2</sup>	1,665	2,500	3,331	4,166

### *Выводы*

1. Подрессоривание передних кареток у валочно-трелёвочных машин позволяет уменьшить вибровоздействие на оператора по виброускорению по сравнению с ВПМ. При этом перемещения оператора ВТМ на сиденье более значительны, чем у ВПМ.

2. В целях снижения уровня вибровоздействия на оператора ВТМ целесообразно в режимах наведения ЗСУ на дерево не допускать скоростей перемещения элементов манипулятора свыше 0,05...0,1 рад/с.

3. Разработанная математическая модель динамической системы «Оператор – ВТМ – предмет труда – дерево» позволяет с погрешностью 8-10% определять уровень вибровоздействия на оператора ВТМ в процессе наведения ЗСУ на дерево на этапе разработки конструкторской документации.

### **Библиографический список**

*Александров В.А.* Динамические нагрузки в лесосечных машинах. Л.: ЛГУ, 1984. 152 с.

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

### **References**

*Aleksandrov V.A.* Dinamicheskie nagruzki v lesosechnykh mashinakh. Leningrad: LGU, 1984. 152 s. (In Russ.)

*Aleksandrov V.A.* Modelirovanie tekhnologicheskikh protsessov lesnykh mashin. Moscow: Ekologiya, 1995. 256 s. (In Russ.)

*Материал поступил в редакцию 05.06.2018 г.*

---

**Александров В.А., Гомон Д.Ю.** Вибронагруженность оператора валочно-трелёвочной машины в процессе наведения захватно-срезающего устройства на дерево // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2018. Вып. 223. С. 165–173. DOI: 10.21266/2079-4304.2018.223.165-173

Разработана динамическая модель системы «Оператор – валочно-трелёвочная машина – предмет труда – дерево». Математическое описание составлено в форме уравнения Лагранжа 2-го рода. Система дифференциальных уравнений решена относительно упругой деформации сидения. Апробация модели осуществлена на примере серийно выпускаемой валочно-трелёвочной машины ЛП-17А.

**Ключевые слова:** динамическая модель, математическое описание, нагруженность.



**Aleksanrov V.A., Gomon D.Yu.** Vibration effect to the operator of feller-skidder in the process of pointing the grapple head on a tree. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehneskoj Akademii*, 2018, is. 223, pp. 165–173 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2018.223.165-173

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 Lagranzha second number. The system of the equation is volved concerning elastic deformation of the suspension seats. Model approbation is carried out on an example of serially felling and skidding machine LP-17A.

**Key words:** dynamic model, mathematical description, faller bencher.

---

**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

**ALEKSANROV Valentin A.** – DSc (Technical), Professor, St.Petersburg State Forest Technical University.

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

**ГОМОН Денис Юрьевич** – соискатель ученой 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.** – postgraduate student, St.Petersburg State Forest Technical University.

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