

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

ВИБРОНАГРУЖЕННОСТЬ ОПЕРАТОРА ВАЛОЧНО-ПАКЕТИРУЮЩЕЙ МАШИНЫ В РЕЖИМЕ РАЗГОНА ПРИ ТРОГАНИИ С МЕСТА

Введение. В процессе ведения лесозаготовок, особенно при разборе леса после ветровалов или на выборочных рубках леса, операторы валочно-пакетирующих машин применяют приём вывода срезанного дерева или облома ходом машины.

Для работы валочно-пакетирующих машин наиболее характерны три основных случая движения [1]: через обособленные неровности, по непрерывно чередующимся периодическим неровностям, со случайным микропрофилем. В отдельных случаях возможны технологические переезды и при отсутствии неровностей.

В данном случае рассмотрим движение ВПМ в процессе выведения срезанного дерева из древостоя ходом машины по поверхности без неровностей.

На рис. 1 представлена расчетная схема динамической системы «оператор – ВПМ – предмет труда – дерево».

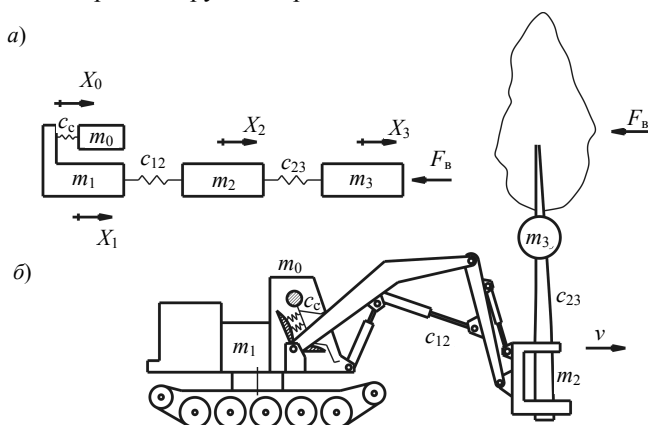


Рис. 1. Расчетные схемы динамической системы «оператор – ВПМ – дерево»: а) эквивалентная б) исходная

Fig. 1. The calculation scheme of the dynamic system «operator – feller-buncher – tree»: a) equivalent; b) basic

Методика исследования. В основу исследования положен метод математического моделирования.

Принятые обозначения:

m_1, m_2, m_3, m_0 – приведенные массы машины, манипулятора с ЗСУ, дерева, оператора соответственно;

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

c_{12}, c_{23}, c_c – приведенные жёсткости манипулятора, дерева и сиденья соответственно;

P_0 – касательная сила тяги;

F_b – сопротивление перемещению дерева.

Кинетическая энергия 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 следующую систему уравнений:

$$\begin{aligned} m_1 | m_0 \ddot{X}_0 + C_c X_0 &= C_c X_1; \\ m_2 | m_0 | m_1 \ddot{X}_1 + C_c (X_1 - X_0) + C_{12} (X_1 - X_2) &= P_0; \\ m_1 | m_3 | m_2 \ddot{X}_2 + C_{23} (X_2 - X_3) &= C_{12} (X_1 - X_2); \\ m_2 | m_3 \ddot{X}_3 + F_b &= C_{23} (X_2 - X_3). \end{aligned} \quad (1)$$

Умножим первое уравнение системы (1) на m_1 , второе уравнение – на m_0 и вычтем из первого произведения второе

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

или

$$\begin{aligned} -m_0 m_1 (\ddot{X}_1 - \ddot{X}_0) - m_1 C_c (X_1 - X_0) - m_0 C_c (X_1 - X_0) - \\ - m_0 C_{12} (X_1 - X_2) &= -m_0 P_0. \end{aligned}$$

Или, окончательно,

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

Далее домножим третье уравнение системы (1) на m_3 , четвертое уравнение – на m_2 и вычтем из первого произведения второе, т. е.

$$m_2 m_3 (\ddot{X}_2 - \ddot{X}_3) + m_3 C_{23} (X_2 - X_3) - m_2 F_B = m_3 C_{12} (X_1 - X_2) - m_2 C_{23} (X_2 - X_3),$$

или

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

Далее умножим второе уравнение системы (1) на m_2 , третье уравнение – на m_1 и вычтем из первого произведение второе:

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

или

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

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

$$\begin{aligned} (X_2 - X_3) &= \frac{m_1 m_2}{m_1 C_{23}} (\ddot{X}_1 - \ddot{X}_2) + \frac{m_2 C_c}{m_1 C_{23}} (X_1 - X_0) + \\ &+ \frac{(m_1 + m_2) C_{12}}{m_1 C_{23}} (X_1 - X_2) - \frac{P_0 m_2}{m_1 C_{23}}, \\ (\ddot{X}_2 - \ddot{X}_3) &= \frac{m_2}{C_{23}} (X_1^{IV} - X_2^{IV}) + \frac{m_2 C_c}{m_1 C_{23}} (\ddot{X}_1 - \ddot{X}_0) + \\ &+ \frac{(m_1 + m_2) C_{12}}{m_1 C_{23}} (\ddot{X}_1 - \ddot{X}_2). \end{aligned}$$

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

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

Из уравнения (2) имеем:

$$\begin{aligned} (X_1 - X_2) &= -\frac{m_1}{C_{12}} (\ddot{X}_1 - \ddot{X}_0) - \frac{(m_0 + m_1) C_c}{m_0 C_{12}} (X_1 - X_0) + \frac{m_0 P_0}{m_0 C_{12}}, \\ (\ddot{X}_1 - \ddot{X}_2) &= -\frac{m_1}{C_{12}} (X_1^{IV} - X_0^{IV}) - \frac{(m_0 + m_1) C_c}{m_0 C_{12}} (\ddot{X}_1 - \ddot{X}_0), \\ (X_1^{IV} - X_2^{IV}) &= -\frac{m_1}{C_{12}} (X_1^{VI} - X_0^{VI}) - \frac{(m_0 + m_1) C_c}{m_0 C_{12}} (X_1^{IV} - X_0^{IV}). \end{aligned}$$

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:

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

Введем обозначения:

$$A = \left[\frac{m_2^2 m_3 (m_0 + m_1) C_c m_1 + m_2 m_3 (m_1 + m_2) C_{12} m_1 m_0 + \dots}{m_0 m_1^2 m_2^2 m_3} \dots \right. \\ \left. \dots \frac{(m_2 + m_3) C_{23} m_1^2 m_2 m_0}{m_0 m_1^2 m_2^2 m_3} \right], 1/c^2;$$

$$B = \left[\frac{m_2 m_3 (m_1 + m_2) C_{12} (m_0 + m_1) C_c - m_2^2 m_3 C_c m_0 C_{12} + \dots}{m_0 m_1^2 m_2^2 m_3} \dots \right. \\ \left. \dots \frac{(m_2 + m_3) C_{23} m_1 m_2 (m_0 + m_1) C_c + m_1 (m_2 + m_3) C_{23} (m_1 + m_2) C_{12} m_0 - \dots}{m_0 m_1^2 m_2^2 m_3} \right], 1/c^4;$$

$$C = \left[\frac{(m_0 + m_1) C_c (m_2 + m_3) C_{23} (m_1 + m_2) C_{12} - (m_2 + m_3) C_{23} m_2 C_c m_0 C_{12} + \dots}{m_0 m_1^2 m_2^2 m_3} \dots \right. \\ \left. \dots \frac{m_3 C_{12} (m_0 + m_1) C_c m_1 C_{23}}{m_0 m_1^2 m_2^2 m_3} \right], 1/c^6;$$

$$D = \left[\frac{(m_2 + m_3) C_{23} P_0 m_2 m_0 C_{12} - m_0 P_0 (m_2 + m_3) C_{23} (m_1 + m_2) C_{12} + \dots}{m_0 m_1^2 m_2^2 m_3} \dots \right. \\ \left. \dots \frac{+ m_3 C_{12} m_0 P_0 m_1 C_{23} + m_2 F_B m_0 m_1 C_{12} C_{23}}{m_0 m_1^2 m_2^2 m_3} \right], m/c^6.$$

Тогда окончательно дифференциальное уравнение примет вид

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

Результаты исследования (см. рис. 2 и таблицу).

Принимаем исходные данные применительно к ВПМ ЛП-19А:

$$m_1 = 25000 \text{ кг}; \quad m_2 = 2140 \text{ кг}; \quad C_{12} = 420 \text{ кН/м}; \quad C_c = 5 \text{ кН/м};$$

$$V = 2,0 \text{ м}^3; \quad (G_d = 20000 \text{ Н}, \quad C_{23} = 65 \text{ кН/м}); \quad m_3 = 1023 \text{ кг}.$$

1. Определяем коэффициенты дифференциального уравнения (6):

$$A = 391,45; \quad B = 33248; \quad C = 1625,22 \cdot 10^2.$$

2. Решаем дифференциальное уравнение (6) методом Рунге–Кутта при начальных условиях:

$$\Theta_1 = \dot{\Theta}_1 = \ddot{\Theta}_1 = \Theta_1^{IV} = \Theta_1^V = 0,$$

$$\ddot{\Theta}_1 = 0,2; 0,4; 0,6; 0,8 \text{ м/с}^2.$$

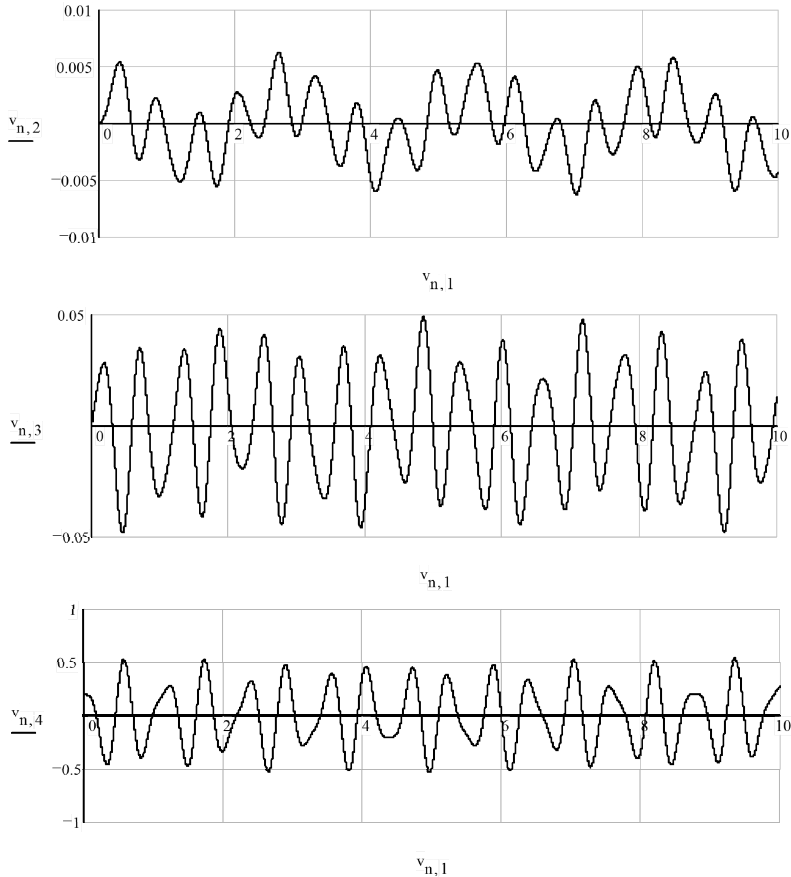


Рис. 2. Графики вибрационного воздействия на оператора ВПМ в режиме разгона при трогании с места ($\ddot{\Theta}_1 = 0,2 \text{ рад/с}^2$):

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

Рис. 2. Graphs of the vibration effect on the operator of feller buncher in the mode of starting from the place ($\ddot{\Theta}_1 = 0.2 \text{ rad / sec}^2$):

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

Анализ полученных результатов показывает, что процесс разгона ва- лочно-пакетирующей машины при трогании с места сопровождается высо- ким вибрационным воздействием на оператора, превышающим допускае- мые значения по санитарным нормам СН 2.2.4/2.1.8.566–96 в 1,8–3,6 раза.

**Характеристики вибровоздействия на оператора ВПМ
в режиме разгона при трогании с места**

**Characteristics of vibration effect to the operator of feller buncher
in the mode of starting from the place**

Характеристики	$\ddot{\Theta}_1, \text{м/с}^2$			
	0,2	0,4	0,6	0,8
$\Theta_1, \text{м}$	0,006	0,013	0,019	0,025
$\dot{\Theta}_1, \text{м/с}$	0,049	0,098	0,147	0,196
$\ddot{\Theta}_1, \text{м/с}^2$	0,539	1,078	1,617	2,156

Выводы.

1. Вибронагруженность операторов валочно-пакетирующих машин в режимах разгона при трогании с места значительно превышает санитарные нормы.

2. В целях снижения вибронагруженности операторов при разгоне целесообразно ограничивать скорость движения. При этом время разгона должно быть не менее 0,4–0,6 с.

3. Разработанная модель позволяет определить вибрационное воздействие на операторов ВПМ на этапе разработки конструкторской документации.

Библиографический список

Гасымов Г.Ш., Александров В.А. Динамика валочно-пакетирующих машин. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. 244 с.

References

Gasymov G.Sh., Aleksandrov V.A. Dinamika valочно-paketiruiushchikh machine. SPb.: Izd-vo Politekh, un-ta, 2014. 244 p. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 05.12.2017 г.

Александров В.А., Лузанова Л.Н., Александров А.В. Вибронагруженность оператора валочно-пакетирующей машины в режиме разгона при трогании с места // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2018. Вып. 222. С. 122–130. DOI: 10.21266/2079-4304.2018.222.122-130

Разработана модель динамической системы: «оператор – валочно-пакетирующая машина – предмет труда – дерево». 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-пакетирующих машин ЛП-19А в режиме разгона при трогании с места. Установлено, что вибронагруженность операторов ВПМ превышает санитарные нормы в 1,8–3,6 раза. Для снижения вибронагруженности операторов целесообразно ограничивать ускорения трогания машины с места до $0,4 \text{ м/с}^2$.

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

Aleksandrov V.A., Luzanova L.N., Aleksandrov A.V. Vibration effect to the operator of feller buncher in the mode of starting from the place. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2018, is. 222, pp. 122–130 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2018.222.122-130

In article the model of biodynamic system is developed «the operator – feller – the packaging car (feller – buncher machine) – an object of the labor – a tree». The mathematical description is worked out in the form of the equation of Lagranzha second number. The system of the equations is solved concerning elastic deformation suspension seats of the operator by a method of Runge–Kutta, by engineering math software MathCAD. Model approbation is carried out on an example of serially let out feller-packaging cars LP-19A 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 1.8–3.6 times. For decrease vibroloading operators it is expedient to limit accelerations at start-off from the place to 0.4 m/s^2 .

Key words: feller-the packaging car (feller-buncher machine), mathematical models, vibration, seat.

АЛЕКСАНДРОВ Валентин Александрович – заведующий кафедрой технологических процессов и машин лесного комплекса, профессор Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, доктор технических наук.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: 2944218@mail.ru

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

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: 2944218@mail.ru

АЛЕКСАНДРОВ Алексей Валентинович – доцент кафедры технологических процессов и машин лесного комплекса Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, кандидат технических наук.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: 2944218@mail.ru

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

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: 2944218@mail.ru

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

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: 2944218@mail.ru

LUZANOVA Lyudmila N. – the senior teacher of department of health and safety, St.Petersburg State Forest Technical University.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: 2944218@mail.ru