УДК 629.3.017

НАГРУЖЕННОСТЬ СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ ВАЛОЧНО-ПАКЕТИРУЮЩЕЙ МАШИНЫ В РЕЖИМЕ АВАРИЙНОГО ТОРМОЖЕНИЯ МАНИПУЛЯТОРА

Шоль Н.Р., Александров В.А., Тимохов Р.С., Тимохова О.М.

ФГБОУ ВПО «Ухтинский государственный технический университет», Ухта, e-mail: chonochka@mail.ru

По результатам наблюдения за работой валочно-пакетирующих машин при заготовке, разборе завалов леса часто возникают режимы аварийного торможения стрелы манипулятора при подъеме или спускании горизонтально расположенного дерева, вследствие чего происходят колебания масс динамической системы значительных амплитуд. Режим аварийного торможения стрелы манипулятора при подъеме (опускании) горизонтально расположенного дерева сопровождается добавочной динамической нагрузкой на машину. Невысокие значения коэффициентов динамичности определяются большим статистическим моментом в этом случае. При этом снижение частоты вращения коленчатого вала двигателя происходит в пределах допустимых значений. Разработанная математическая модель динамической системы позволяет с погрешностью 8–10% определить уровень воздействия на силовую установку в режимах разгона или торможения при освобождении основания деревьев от снега, на этапе разработки конструкторской документации.

Ключевые слова: валочно-пакетирующая машина, дерево, манипулятор, торможение, математическая модель

LOADING POWERPLANT FELLER BUNCHERS MODE EMERGENCY BRAKING ROCKER

Shol N.R., Aleksandrov V.A., Timokhov R.S., Timokhova O.M.

FGBOU VPO «Ukhta State Technical University», Ukhta, e-mail: chonochka@mail.ru

As a result of monitoring the work of feller-bunchers in the procurement, removing the debris of the forest, there are often regimes emergency braking the boom arm when climbing or the descent of a horizontal tree, so that the mass oscillates dynamic system of significant amplitude. Emergency braking mode manipulators boom-pa when lifting (lowering) a horizontal tree, accompanied by additional di-dynamical load on the machine. Low values of the coefficients are determined by a large dynamic statistical point in this case. The decrease in engine speed motor is within the permissible range. The developed mathematical model of the dynamic system allows an accuracy of 8–10% to determine the level of impact on the power plant in the modes of acceleration or deceleration in the liberation of the base of the trees with snow on the stage of development of design documentation.

Keywords: feller buncher, a tree, a manipulator, braking, mathematical model

При разборе завалов леса часто возникают режимы аварийного торможения стрелы манипулятора при подъеме или спускании горизонтально расположенного дерева, вследствие чего происходят колебания масс динамической системы значительных амплитуд. На рису. 1 представлена расчетная схема системы «ВПМ – предмет труда – дерево» для исследования данного режима работы.

Кинетическая энергия системы

$$T = \frac{1}{2}J_1\dot{\varphi}_1^2 + \frac{1}{2}J_2\dot{\varphi}_2^2 + \frac{1}{2}J_3\dot{\varphi}_3^2.$$

Потенциальная энергия системы

$$\Pi = \frac{1}{2}C_{12}\left(\varphi_1 - \varphi_2\right)^2 + \frac{1}{2}C_{23}\left(\varphi_2 - \varphi_3\right)^2.$$

В выражении кинетической энергии

$$J_2 = \frac{J_2^0}{i_\Pi^2};\quad J_3 = \frac{J_3^0}{i_\Pi^2},$$

где i_Π – передаточное число $\left(i_\Pi = \frac{\dot{\varphi}_1}{\dot{\varphi}_2^0}\right)$.

В соответствии с уравнением Лагранжа II-го рода имеем следующую систему уравнений:

$$\begin{gathered} J_1\ddot{\varphi}_1 + C_{12}(\varphi_1 - \varphi_2) = M_Д; \\ J_2\ddot{\varphi}_2 + C_{23}\left(\varphi_2 - \varphi_3\right) = C_{12}\left(\varphi_1 - \varphi_2\right); \\ J_3\ddot{\varphi}_3 + M_c = C_{23}\left(\varphi_2 - \varphi_3\right). \end{gathered} \quad (1)$$

Домножим уравнение (1) системы (1) на J_2, уравнение (2) на J_1, уравнение (2) на J_3 и уравнение (3) на J_2 и соответственно вычтем из первого второе.

$$J_2J_2(\ddot{\varphi}_1 - \ddot{\varphi}_2) + J_2C_{12}(\varphi_1 - \varphi_2) - J_1C_{23}(\varphi_2 - \varphi_3) = J_2M_Д - J_1C_{12}(\varphi_1 - \varphi_2)$$

или

$$J_2J_2(\ddot{\varphi}_1 - \ddot{\varphi}_2) + (J_1 + J_2)C_{12}(\varphi_1 - \varphi_2) - J_1C_{23}(\varphi_2 - \varphi_3) = J_2M_Д. \quad (2)$$

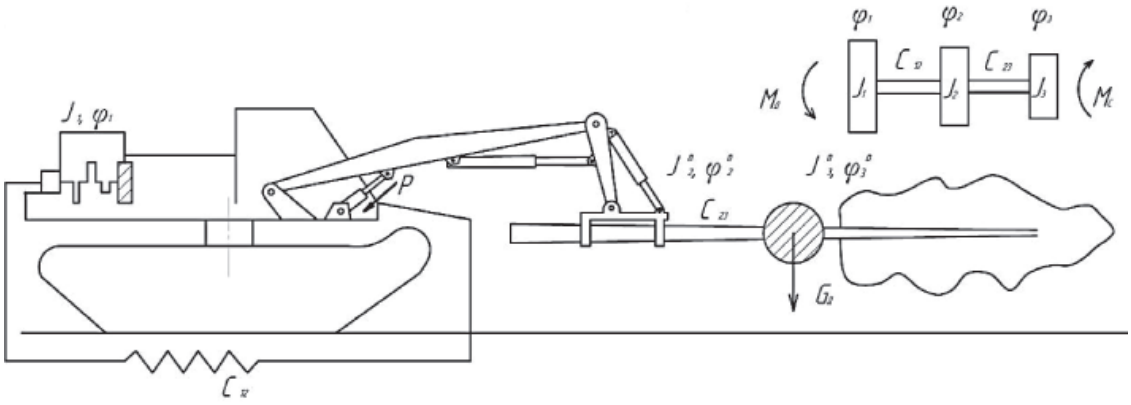

Рис. 1. Расчетная схема динамической системы «ВПМ – предмет труда – дерево»:
а – исходная; б – эквивалентная.
Принятые обозначения:
J_1 – приведённый момент инерции кривошипно-шатунного механизма, маховика и сцепления;
J_2, J_3 – приведенные к коленчатому валу моменты инерции
соответствующего манипулятора с ЗСУ и дерева; φ_1, φ_2, φ_3 – обобщенные угловые координаты
масс соответственно с моментами инерции J_1, J_2, J_3; C_{12} – крутильная жесткость коленчатого
вала, гидропередачи и манипулятора; C_{23} – приведенная крутильная жесткость дерева;
$M_Д$ – приведенный крутящий момент гидропередачи; $M_{спр}$ – приведенный момент сопротивления;
P – усилие на штоке (штоках) гидроприводов подъема (опускания) стрелы; r – плечо силы P;
$G_д$ – сила тяжести дерева

Далее

$$J_2J_3(\ddot{\varphi}_2-\ddot{\varphi}_3)+J_3C_{23}(\varphi_2-\varphi_3)-J_2M_c=J_3C_{12}(\varphi_1-\varphi_2)-J_2C_{23}(\varphi_2-\varphi_3),$$

или преобразуя,

$$J_2J_3(\ddot{\varphi}_2-\ddot{\varphi}_3)+(J_2+J_3)C_{23}(\varphi_2-\varphi_3)-J_2M_c=J_3C_{12}(\varphi_1-\varphi_2). \quad (3)$$

Выразим из уравнения (2) $(\varphi_1-\varphi_2)$ и $(\ddot{\varphi}_2-\ddot{\varphi}_3)$

$$(\varphi_2-\varphi_3)=\frac{J_2}{C_{23}}(\ddot{\varphi}_1-\ddot{\varphi}_2)+\frac{(J_1+J_2)C_{12}}{J_1C_{23}}(\varphi_1-\varphi_2)-\frac{J_2M_Д}{J_1C_{23}};$$

$$(\ddot{\varphi}_2-\ddot{\varphi}_3)=\frac{J_2}{C_{23}}(\varphi_1^{IV}-\varphi_2^{IV})+\frac{(J_1+J_2)C_{12}}{J_1C_{23}}(\ddot{\varphi}_1-\ddot{\varphi}_2).$$

Подставим значения для $(\varphi_2-\varphi_3)$ и $(\ddot{\varphi}_2-\ddot{\varphi}_3)$ в уравнение (3) и преобразуем

$$\frac{J_2^2J_3}{C_{23}}\left(\varphi_1^{IV}-\varphi_2^{IV}\right)+\frac{J_2J_3(J_1+J_2)C_{12}}{J_1C_{23}}(\ddot{\varphi}_1-\ddot{\varphi}_2)+(J_2+J_3)J_2(\ddot{\varphi}_1-\ddot{\varphi}_2)+$$

$$+\frac{(J_2+J_3)(J_1+J_2)C_{12}}{J_1}(\varphi_1-\varphi_2)--\frac{J_2\ M_Д}{J_1C_{23}}\cdot(J_2+J_3)C_{23}-J_2M_C=J_3C_{12}(\varphi_1-\varphi_2);$$

$$\left(\varphi_1^{IV}-\varphi_2^{IV}\right)+\frac{\left[J_3(J_1+J_2)C_{12}+(J_2+J_3)J_1C_{23}\right]}{J_1J_2J_3}(\ddot{\varphi}_1-\ddot{\varphi}_2)+$$

$$+\frac{C_{12}\left[(J_2+J_3)(J_1+J_2)-J_1J_3\right]C_{23}}{J_1J_2^2J_3}(\varphi_1-\varphi_2)=\frac{\left[M_Д(J_2+J_3)-J_1M_C\right]C_{23}}{J_1J_2J_3}.$$

И окончательно

$$(\varphi_1^{IV}-\varphi_2^{IV})+A(\ddot{\varphi}_1-\ddot{\varphi}_2)+B(\varphi_1-\varphi_2)=C_2, \quad (4)$$

$$A=\frac{\left[J_3(J_1+J_2)C_{12}+(J_2+J_3)J_1C_{23}\right]}{J_1J_2J_3};$$

$$B = \frac{C_{12}\left[(J_2 + J_3)(J_1 + J_2) - J_1 J_3\right] C_{23}}{J_1 J_2^2 J_3};$$

$$C = \frac{\left[M_Д (J_2 + J_3) - J_1 M_C\right] C_{23}}{J_1 J_2 J_3}.$$

Вводя новую переменную

$$\theta_1 = (\varphi_1 - \varphi_2) - \frac{C}{B},$$

получим однородное уравнение вида

$$\frac{d^4\theta_1}{dt^4} + A\frac{d^2\theta_1}{dt^2} + B\theta_1 = 0. \qquad (5)$$

Его характеристическое уравнение имеет вид

$$k^4 + Ak^2 + B = 0. \qquad (6)$$

Решение уравнения (5) запишется как

$$\theta_1 = C_1 \sin k_1 t + C_2 \cos k_1 t + C_3 \sin k_2 t + C_4 \cos k_2 t, \qquad (7)$$

где

$$k_{1,2}^2 = \sqrt{\frac{1}{2}\frac{\left[J_3(J_1 + J_2)C_{12} + (J_2 + J_3)J_1 C_{23}\right]}{J_1 J_2 J_3}} \pm$$

$$\pm\sqrt{\left\{\frac{1}{2}\frac{\left[J_3(J_1 + J_2)C_{12} + (J_2 + J_3)J_1 C_{23}\right]}{J_1 J_2 J_3}\right\}^2 - \frac{C_{12}\left[(J_2 + J_3)(J_1 + J_2) - J_1 J_3\right] C_{23}}{J_1 J_2^2 J_3}}.$$

Пример. Принимаем исходные данные применительно к ВПМ ЛП-19А

L = 5 м; V = 2,0 м^3; $h_Т$ = 12 м; J_1 = 4,05 кг·м^2; $\dot{\varphi}_1$ =1 57с$^{-1}$; $\left(\dot{\varphi}_2^0 = 0{,}2\ с^{-1}\right)$ C_{12} = 30,7 Н·м; $J_2^0 = 51000$ кг·м^2; J_2 = 0,083 кг·м^2; $J_3^0 = 247570$ кг·м^2; J_3 = 0,402 кг·м^2; C_{23} = 1,825 Н·м;

Рассмотрим режимы работы при подъеме дерева стрелой.

1. Определяем коэффициенты дифференциального уравнения (4)

$$A = \frac{[0{,}402 \cdot (4{,}05 + 0{,}083) \cdot 30{,}7 + (0{,}083 + 0{,}402) \cdot 4{,}05 \cdot 1{,}825]}{4{,}05 \cdot 0{,}083 \cdot 0{,}402} = 404{,}38\ c^{-2};$$

$$B = \frac{30{,}7[(0{,}083 + 0{,}402) \cdot (4{,}05 + 0{,}083) - 4{,}05 \cdot 0{,}402] \cdot 1{,}825}{4{,}05 \cdot 0{,}083 \cdot 0{,}083 \cdot 0{,}402} = 1884{,}82\ c^{-4}.$$

2. Найдем частоты колебаний нагрузки

$$k^2{}_{1,2} = -\frac{A}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{A}{2}\right)^2 - B} = \frac{404}{2} \pm \sqrt{(202)^2 - 1884} = 202 \pm 197{,}28\, c^{-1};$$

$$k_1 = 19{,}92\ с^{-1}; \quad k_2 = 2{,}17\ с^{-1}.$$

3. Определяем постоянные интегрирования $C_1 \ldots C_4$.

В соответствии с режимом работы принимаем начальные условия:

$$\theta_1\big|_{t=0}^{=0}; \quad \dot{\theta}_1\big|_{t=0}^{=0}; \quad \ddot{\theta}_1\Big|_{t=0}^{=\frac{\dot{\varphi}_{20прив}}{t_p}}; \quad \dddot{\theta}_1\big|_{t=0}^{=0}.$$

При этих начальных условиях выражения для определения постоянных будут: $C_1 = C_3 = 0$;

$$C_2 = -\frac{\dot{\varphi}_{20прив}}{t_p\left(k_1^2 - k_2^2\right)},\ рад; \quad C_4 = \frac{\dot{\varphi}_{20прив}}{t_p\left[k_1^2 - k_2^2\right]}.$$

Примем $\dot{\varphi}_{20прив} = 0{,}02\ с^{-1}$ и $t_р$ = 0,15 с.

Тогда $\dot{\varphi}_{20прив} = 0{,}02 \cdot 785 = 15{,}7\ с^{-1}$.

$$C_2 = -\frac{15{,}7}{0{,}15[19{,}98^2 - 2{,}17^2]} = -\frac{15{,}7}{59{,}173} = -0{,}265\ рад;$$

$$C_4 = 0{,}265\ рад.$$

4. Определяем максимальную динамическую нагрузку на силовую установку ВПМ:
– деформацию упругой связи C_{12}

$$\theta_1 = -0{,}265\cos 19{,}98t + 0{,}265\cos 2{,}17t; \quad \theta_{1\max} = 0{,}529 \text{ рад};$$

– динамический добавочный момент, приведенный к коленчатому валу

$$M_{\text{дин}}^{\text{доб}} = C_{12}\theta_1 = 30{,}7 \cdot 0{,}529 = 16{,}240 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

– статический момент, приведенный к коленчатому валу

$$M_{c_{\text{пр}}} = \frac{(G_{\text{ЗСУ}} + G_{\text{пр}}) \cdot L + G_{\text{д}} \cdot (L + h_T)}{i_n} = \frac{(15400 + 5310) \cdot 20650 \cdot 17}{785} = 579{,}108 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Отбираемая мощность от силовой установки на привод гидронасоса

$$N_{\text{Н}} = M_{c_{\text{пр}}} \cdot \dot{\varphi}_1 = 579{,}108 \cdot 157 = 90{,}92 \text{ кВт}.$$

Снижение частоты вращения коленчатого вала

$$n' = n_{\text{ном}} - 9550\frac{N_H}{M_\Sigma}; \quad N := 10; \quad t := 0{,}0001...N; \; n := 0...N;$$

$$if\left(|\max(x)| > |\min(x)|, \max(x), \min(x)\right).$$

$$\varphi(t) := -0{,}265 \cdot \cos(19{,}92 \cdot t) + (0{,}265 \cdot \cos(2{,}17 \cdot t).$$

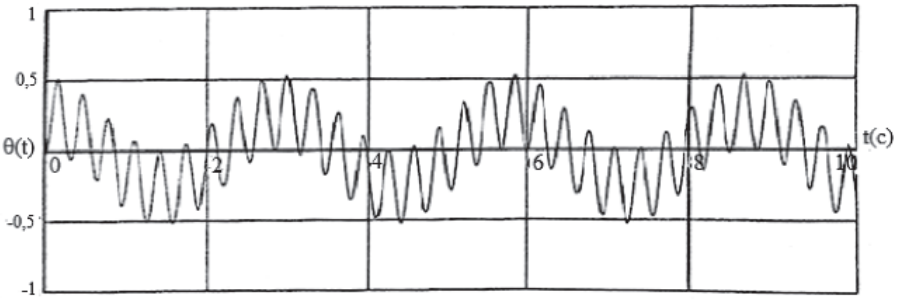

Рис. 2. График изменения деформации упругой связи C_{12} при разгоне системы ($\dot{\varphi}_{20\text{прив}} = 15{,}7\text{с}^{-1}$, t_p = 0,15 с)

В случае аварийного торможения системы начальные условия будут

$$\theta_1\big|_{t=0}^{=0}; \quad \dot{\theta}_1\big|_{t=0}^{=0}; \quad \ddot{\theta}_1\Big|_{t=0}^{=-\frac{\dot{\varphi}_{20\text{прив}}}{t_T}}; \quad \dddot{\theta}_1\big|_{t=0}^{=0}.$$

$$C_2 = \frac{\dot{\varphi}_{20\text{прив}}}{t_T\left[k_1^2 - k_2^2\right]}; \quad C_4 = -\frac{\dot{\varphi}_{20\text{прив}}}{t_T\left[k_1^2 - k_2^2\right]}.$$

То есть

$$\theta_1 = 0{,}265\cos 19{,}98\,t - 0{,}265\cos 2{,}17t,$$

где $n_{\text{ном}}$ – номинальная частота вращения коленчатого вала; M_Σ – суммарный момент.

$$n' = 1500 - 9550\frac{90{,}92}{579{,}108 + 16{,}240} = 1500 - 1458{,}45 = 41{,}55 \text{ об}/\text{мин}.$$

Здесь $M_\Sigma = 579{,}208 + 16{,}240 = 595{,}348$ Н·м.

Режим аварийного торможения стрелы манипулятора при подъеме (опускании) горизонтально расположенного дерева сопровождается добавочной динамической нагрузкой на машину. Невысокие значения коэффициентов динамичности определяются большим статистическим моментом в этом случае. При этом снижение частоты вращения коленчатого вала двигателя происходит в пределах допустимых значений.

Разработанная математическая модель динамической системы позволяет с погрешностью 8–10 % определить уровень воздействия на силовую установку в режимах разгона или торможения при освобождении основания деревьев от снега, на этапе разработки конструкторской документации.

Список литературы

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

2. Александров В.А. Конструирование и расчет машин и оборудования для лесосечных работ и нижних складов: учебник. – 2-е изд., перераб. и доп. / В.А. Александров, Н.Р. Шоль. – СПб.: Изд-во «Лань», 2012. – 256 с : ил.

3. Александров В.А. Моделирование технологических процессов лесных машин: учебник для вузов / В.А. Александров, А.В. Александров. – СПб.: СПбГЛТА, 2009. – 297 с.

4. Васильев Г.М. Многооперационные машины для нижнескладских работ. – М.: Лесная промышленность, 1979. – 120 с.

5. Железко Б.Е. Основы теории и динамика автомобильных и тракторных двигателей. – Минск: Высшая школа, 1980. – 304 с.