УДК 630*377:621.86.072:519.87

# НАГРУЖЕННОСТЬ СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ БЕСЧОКЕРНОГО ТРАКТОРА В ПРОЦЕССЕ ПОДЪЕМА ДЕРЕВА СТРЕЛОЙ

**Александров В.А., Шоль Н.Р., Шакирзянов Д.И., Снопок Д.Н.**
*ФГБОУ ВПО «Ухтинский государственный технический университет», Ухта, e-mail: chonochka@mail.ru*

При работе бесчокерного трелёвочного трактора технологическая операция – подъём дерева стрелой манипулятора является основной и наиболее нагруженной. По расчетной схеме и исходным данным применительно к бесчокерному трелёвочному трактору ТБ-1 выполнен расчет основных показателей двигателя в этом режиме работы машины. Получено, что значительная динамическая нагрузка на силовую установку приводит к предельно допускаемому снижению частоты вращения коленчатого вала. Разработанная в статье математическая модель позволяет определить нагруженность силовой установки бесчокерного трелёвочного трактора в режимах подъема-опускания дерева стрелой манипулятора на стадии разработки конструкторской документации. Для уменьшения нагруженности силовой установки трактора в данном режиме работы необходимо снижать скорость пускового режима или увеличивать время разгона динамической системы.

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

# LOADING POWERPLANT BESCHORNERIA TRACTOR DURING LIFTING OF THE TREE BY AN ARROW

**Aleksandrov V.A., Shol N.R., Shakirzyanov D.I., Snopok D.N.**
*Ukhta State Technical University, Ukhta, e-mail: chonochka@mail.ru*

When working beskonusnogo skidder manufacturing operation – lifting the tree by the arrow of a manipulator is the main and the most loaded. By design scheme and initial data in relation to bessokirnaya skidder tractor TB-1 the calculation of basic performance of the engine in this mode of operation of the machine. It was obtained that significant dynamic load on the C-charger installation leads to a maximum permissible reduction of frequency of rotation cranked TB-1. Developed in the article the mathematical model allows to determine the load of the power plant beskonusnogo skidder in the modes of up-down tree jib Mani-pulator at the stage of developing design documentation. To reduce the load of the C-charger installation tractor in this operation mode it is necessary to reduce the speed start mode or to increase the acceleration of a dynamic system.

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

При работе бесчокерного трактора технологическая операция – подъём дерева стрелой манипулятора является основной и наиболее нагруженной [1, 2].

На рис. 1 представлена расчетная схема для исследования динамического нагружения бесчокерного трактора в этом режиме работы.

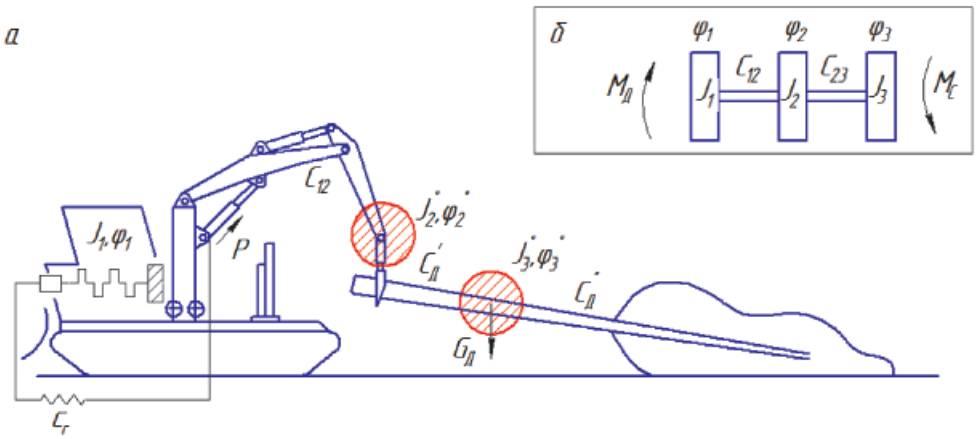



*Рис. 1. Расчетная схема динамической системы «ВТМ – дерево»: а – исходная; б – эквивалентная*

Принятые обозначения:

$J_1$ – момент инерции кривошипно-шатунного механизма, маховика, сцепления и шестерён гидронасоса;

$J_2$ – момент инерции манипулятора, захватного устройства, приведённый к коленчатому валу двигателя;

$J_3$ – момент инерции предмета труда – дерева, приведённый к коленчатому валу;

$\varphi_1$, $\varphi_2$, $\varphi_3$ – угловые перемещения масс соответственно с моментами инерции;

$J_1$, $J_2$, $J_3$;

$C_r$ – приведённая жесткость гидропередачи привода стрелы;

$C_{12}$ – приведённая крутильная жесткость коленчатого вала, металлоконструкции манипулятора и гидропередачи поворота стрелы;

$C_{23}$ – приведённая жесткость дерева;

$C'_Д$, $C''_Д$ – изгибные жесткости соответственно комлевой и вершинной частей дерева;

$M_C$ – приведённый момент сопротивления;

$M_Д$ – крутящий момент, отбираемый от двигателя для привода гидронасоса;

$f_n$ – площадь поршня (поршней) гидроцилиндров привода стрелы;

$P$ – давление в гидросистеме;

$r$ – плечо силы P (усилие на штоках гидроцилиндров привода стрелы);

$L$ – вылет манипулятора.

Допущения:

1. Физико-механические свойства упругих связей постоянны.

2. Движения масс системы описываются линейными дифференциальными уравнениями с постоянными коэффициентами.

3. Величины $L$ и $r$ на пусковых режимах постоянны.

Кинетическая энергия системы:

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

где $J_2 = \dfrac{J_2^0}{i_П^2}$; $J_3 = \dfrac{J_3^0}{i_П^2}$; $i_П = \dfrac{\dot{\varphi}_1}{\dot{\varphi}_2^0}$.

Потенциальная энергия системы:

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

В соответствии с уравнением Лагранжа II рода система дифференциальных уравнений примет вид

$$J_2\ddot{\varphi}_1 + C_{12}(\varphi_1 - \varphi_2) = M_Д;$$

$$J_2\ddot{\varphi}_2 + C_{23}(\varphi_2 - \varphi_3) = C_{12}(\varphi_1 - \varphi_2); \qquad (1)$$

$$J_3\ddot{\varphi}_3 + M_C = C_{23}(\varphi_2 - \varphi_3).$$

Полученную систему уравнений (1) дополним уравнением приведенной угловой скорости поворота манипулятора [1].

$$\dot{\varphi}_2 = \dot{\varphi}_2^0 \cdot i_П = \frac{a - b\cdot p - c\cdot dp/dt}{r\cdot i_П}.$$

Кроме того, домножим уравнение (1) системы (1) на $J_2$, а уравнение (2) на $J_1$ и вычтем из первого второе, то есть

$$J_1J_2\left(\ddot{\varphi}_1 - \ddot{\varphi}_2\right) + J_2C_{12}(\varphi_1 - \varphi_2) - J_1C_{23}(\varphi_2 - \varphi_3) = J_2\,M_Д - J_1C_{12}(\varphi_1 - \varphi_2). \qquad (2)$$

В последнем приписанном уравнении к системе (1) обозначено

$$a = \frac{q_Н n}{60 f_П}\eta'_Н\eta'_Ц; \quad b = \frac{q_Н n}{60 f_П}\left(K_Н\eta'_Н + K_Ц\eta'_Ц\right); \quad c = \frac{K_V\eta'_Ц}{f_П},$$

где $q_Н$ – объёмная постоянная насоса; $n$ – число оборотов вале насоса; $\eta'_Н$, $\eta'_Ц$ – теоретические объемные КПД насоса с распределителем и гидроцилиндра; $K_V$, $K_Н$, $K_Ц$ – коэффициенты пропорциональности; $p$ – давление в гидронасосе; $i_П$ – передаточное число.

К уравнению (2) припишем уравнения (1), (3) и (4) системы (1):

$$J_1J_2\left(\ddot{\varphi}_1 - \ddot{\varphi}_2\right) + (J_1 + J_2)C_{12}(\varphi_1 - \varphi_2) = J_2\,M_Д + J_1C_{23}(\varphi_2 - \varphi_3);$$

$$J_1\ddot{\varphi}_1 + C_{12}(\varphi_1 - \varphi_2) = M_Д; \quad J_3\ddot{\varphi}_3 + M_C = C_{23}(\varphi_2 - \varphi_3); \quad \dot{\varphi}_2 = \frac{a - b\cdot p - c\cdot dp/dt}{r\cdot i_П}. \qquad (3)$$

Из уравнения (1) системы (3) выразим $\varphi_3$:

$$-\frac{J_1J_2}{J_1C_{23}}\left(\ddot{\varphi}_1 - \ddot{\varphi}_2\right) - \frac{\left(J_1 + J_2\right)C_{12}}{J_1C_{23}}(\varphi_1 - \varphi_2) + \frac{J_2M_Д}{J_1C_{23}} + \varphi_2 = \varphi_3.$$

Из полученного выражения для $\varphi_3$ выразим $\ddot{\varphi}_3$:

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

Полученные значения для $\varphi_3$ и $\ddot{\varphi}_3$ подставим в уравнение (3) системы (3):

$$-\frac{J_2J_3}{C_{23}}\left(\varphi_2^{\text{IV}}-\varphi_3^{\text{IV}}\right)-\frac{(J_1+J_2)C_{12}J_3}{J_1C_{23}}\left(\ddot{\varphi}_1-\ddot{\varphi}_2\right)+J_3\ddot{\varphi}_2+M_C=$$
$$=C_{23}\varphi_2+\frac{J_2C_{23}}{C_{23}}\left(\ddot{\varphi}_1-\ddot{\varphi}_2\right)+\frac{(J_1+J_2)C_{12}C_{23}}{J_1C_{23}}(\varphi_1-\varphi_2)-\frac{M_{\text{Д}}J_2C_{23}}{J_1C_{23}}-C_{23}\varphi_2. \quad (4)$$

Учитывая, что $C_{12}(\varphi_1-\varphi_2)\cong\frac{p\cdot f_{\text{П}}r}{i_{\text{П}}}$ [1, 2], определим $p$, $\frac{dp}{dt}$ и $\frac{d^2p}{dt^2}$, то есть

$$p=\frac{C_{12}\cdot i_{\text{П}}}{f_{\text{П}}\cdot r}(\varphi_1-\varphi_2);\qquad \frac{dp}{dt}=\frac{C_{12}\cdot i_{\text{П}}}{f_{\text{П}}\cdot r}\left(\ddot{\varphi}_1-\ddot{\varphi}_2\right)$$

и

$$\frac{d^2p}{dt^2}=\frac{C_{12}\cdot i_{\text{П}}}{f_{\text{П}}\cdot r}\left(\ddot{\varphi}_1-\ddot{\varphi}_2\right). \quad (5)$$

Из уравнения (2) системы (3) выведем $\ddot{\varphi}_1$ и $\varphi_1^{\text{IV}}$:

$$\ddot{\varphi}_1=\frac{M_{\text{Д}}}{J_1}-\frac{C_{12}}{J_1}(\varphi_1-\varphi_2);\quad \varphi_1^{\text{IV}}=-\frac{C_{12}}{J_1}\left(\ddot{\varphi}_1-\ddot{\varphi}_2\right).$$

Значение (5) подставим в уравнение (4) системы (3):

$$\dot{\varphi}_2=\frac{a-b\frac{C_{12}i_{\text{П}}}{f_{\text{П}}\cdot r}(\varphi_1-\varphi_2)-c\frac{C_{12}i_{\text{П}}}{f_{\text{П}}\cdot r}\left(\dot{\varphi}_1-\dot{\varphi}_2\right)}{r\cdot i_{\text{П}}}.$$

Отсюда:

$$\ddot{\varphi}_2=-\frac{b\frac{C_{12}i_{\text{П}}}{f_{\text{П}}\cdot r}\left(\dot{\varphi}_1-\dot{\varphi}_2\right)-c\frac{C_{12}i_{\text{П}}}{f_{\text{П}}\cdot r}\left(\ddot{\varphi}_1-\ddot{\varphi}_2\right)}{r\cdot i_{\text{П}}}.$$

Значения для $\ddot{\varphi}_1, \varphi_1^{\text{IV}}, \ddot{\varphi}_2, \varphi_2^{\text{IV}}$ подставим в уравнение (4) и преобразуем:

$$-\frac{J_2\,J_3\cdot i_{\text{П}}^2cC_{12}}{C_{23}f_{\text{П}}r^2}\left(\varphi_1^{\text{IV}}-\varphi_2^{\text{IV}}\right)+\frac{J_2J_3bC_{12}i_{\text{П}}^2}{J_1C_{23}f_{\text{П}}r^2}\left(\ddot{\varphi}_1-\ddot{\varphi}_2\right)+$$
$$+\left[\frac{J_1J_3C_{12}^2c\cdot i_{\text{П}}^2+J_2J_3C_{12}^2C\,i_{\text{П}}^2+J_1J_3cC_{12}C_{23}i_{\text{П}}^2+J_1J_2cC_{12}C_{23}i_{\text{П}}^2-J_2J_3C_{12}f_{\text{П}}r^2}{J_1C_{23}f_{\text{П}}r^2}\right]\times$$
$$\times\left(\ddot{\varphi}_1-\ddot{\varphi}_2\right)+\left[\frac{J_3(J_1+J_2)C_{12}^2b\cdot i_{\text{П}}^2+J_1C_{12}J_3bC_{23}i_{\text{П}}^2+J_1J_2C_{23}bi_{\text{П}}^2C_{12}}{J_1C_{23}f_{\text{П}}r^2}\right]\left(\dot{\varphi}_1-\dot{\varphi}_2\right)+ \quad (6)$$
$$+\left[\frac{(J_1+J_2)C_{12}J_2C_{23}-J_3(J_1+J_2)C_{12}^2-J_1J_2C_{23}C_{12}}{J_2^2C_{23}}\right](\varphi_1-\varphi_2)=$$
$$=\frac{J_3(J_1+J_2)C_{12}M_{\text{Д}}}{J_1C_{23}J_1}+M_{\text{С}}.$$

Окончательно получим

$$\left(\varphi_1^{\text{IV}}-\varphi_2^{\text{IV}}\right)+A\left(\ddot{\varphi}_1-\ddot{\varphi}_2\right)+B\left(\ddot{\varphi}_1-\ddot{\varphi}_2\right)+C\left(\dot{\varphi}_1-\dot{\varphi}_2\right)+\text{Д}(\varphi_1-\varphi_2)=E, \quad (7)$$

где

$$A=\frac{b}{c};\quad B=\frac{\left[Ci_{\text{П}}^2\left(J_1J_3C_{12}+J_2J_3C_{12}+J_1J_3C_{23}+J_1J_2C_{23}\right)-J_2J_3f_{\text{П}}r^2\right]}{J_1J_2J_3Ci_{\text{П}}^2};$$

$$C = \frac{b\left[\left(J_1 + J_2\right)J_3 C_{12} + J_1 J_3 C_{23} + J_1 J_2 C_{23}\right]}{J_1 J_2 J_3 c};$$

$$Д = \frac{\left[\left(J_1 + J_2\right)J_1 C_{23} - J_3\left(J_1 + J_2\right)C_{12} - J_1 J_2 C_{23}\right] f_П r^2}{J_1^2 J_2 J_3 C i_П};$$

$$E = -\left[\frac{J_3\left(J_1 + J_2\right) r^2 f_П M_Д}{J_1^2 J_2 J_3 c i_П^2}\right] + \left[\frac{M_Д C_{23} f_П r^2}{J_2 J_3 c i_П C_{12}}\right].$$

Уравнение (7) является неоднородным, и его решение будет состоять из частного решения и решения однородного уравнения, то есть $Q = Q_1 + Q_2$.

Частное решение представляет собой приведенную статическую деформацию упругой связи $C_{12}$, то есть $Q_2 = \frac{E}{Д}$.

Введя новую переменную $Q_1 = (\varphi_1 - \varphi_2) - \frac{E}{Д}$, получим однородное дифференциальное уравнение вида

$$\frac{d^4 Q_1}{dt^4} + A\frac{d^3 Q_1}{dt^3} + B\frac{d^2 Q_1}{dt^2} + C\frac{dQ_1}{dt} + DQ_1 = 0. \quad (8)$$

Его характеристическое уравнение будет

$$\psi^4 + A\psi^3 + B\psi^2 + C\psi + D = 0. \quad (9)$$

Уравнение (9) имеет две пары комплексно-сопряжённых корней с отрицательными вещественными частями [3]:

$$\psi_{1,2} = -\alpha \pm ik; \quad \psi_{3,4} = -\beta \pm in. \quad (10)$$

В соответствие с этим решением однородного уравнения (8) будет

$$Q_1 = e^{-\alpha t}(C_1 \cos kt + C_2 \cos kt) + e^{-\beta t}(C_3 \cos nt + C_4 \sin nt).$$

Начальными условиями для режима разгона системы будет:
при $t = 0$

$$Q_1 = 0; \quad \dot{Q}_1 = 0; \quad \ddot{Q}_1 = \frac{\dot{\varphi}_1}{t_p}; \quad \dddot{Q}_1 = 0.$$

**Пример.**

Исходные данные примем применительно к бесчокерному трактору ТБ-1 [4, 5]:

$$\dot{\varphi}_1 = 157 \text{ рад/с}; \quad J_1 = 4{,}05 \text{ кг·м}^2; \quad L = 5 \text{ м}; \quad v = 1 \text{ м/с}; \quad \dot{\varphi}_2^0 = \frac{v}{L} = \frac{1{,}0}{5} = 0{,}2 \text{ рад/с};$$

$$i_П = \frac{157}{0{,}2} = 785; \quad J_2^0 = 246 \cdot 25 = 6150 \text{ кг} \cdot \text{м}^2; \quad J_1 = \frac{J_2^0}{i_П^2} \cong 0{,}01 \text{ кг} \cdot \text{м}^2; \quad f_П = 153 \text{ см}^2;$$

$$C_{12} = 0{,}604 \text{ Н·м}; \quad V = 2{,}0 \text{ м}^3; \quad H = 30 \text{ м}; \quad h_Т = 12 \text{ м}; \quad G_Д = 20465 \text{ Н}; \quad C'_Д = 45 \text{ кН/м};$$

$$C_{23}^0 = 1125 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м}; \quad C_{23} = \frac{C_{23}^0}{i_П^2} = \frac{1125 \cdot 10^3}{785^2} = 1{,}826 \text{ Н} \cdot \text{м}; \quad \dot{\varphi}_3^0 = \frac{v}{H} = 0{,}033 \text{ рад/с};$$

$$J_3^0 = 1023(30 - 1012)^2 = 331452 \text{ кг·м}^2; \quad i_П = \frac{\dot{\varphi}_2^0}{\dot{\varphi}_3^0} = \frac{157}{0{,}033} = 4757{,}6; \quad J_3 = \frac{J_3^0}{i_П^2} = 0{,}0146 \text{ кг·м}^2;$$

$$b = 1{,}57 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/(\text{с·Н}); \quad c = 0{,}275 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{Н}.$$

Определяем коэффициенты дифференциального уравнения (7):

$$A = 5{,}71 \text{ с}^{-1}; \quad B = 369{,}61 \text{ с}^{-2}; \quad c = 2099{,}75 \text{ с}^{-2};$$

$$C = 2099{,}75 \text{ с}^{-2}; \quad Д = 282{,}53 \text{ с}^{-2}.$$

1. Находим корни уравнения:

$$\alpha = \frac{1}{2A_0} = -\frac{5,71}{2\cdot 1} = -2,855\ \text{с}^{-1}; \quad \beta = \frac{C}{2B} = -\frac{2099,75}{2\cdot 369,6} = -\ 2,84\ \text{с}^{-1};$$

$$k = \frac{1}{2A_0}\sqrt{4A_0\cdot Д - A^2} = \frac{1}{2\cdot 1}\sqrt{4\cdot 369,6 - 5,71^2} = 19,01\ \text{с}^{-1};$$

$$n = \frac{1}{2B}\sqrt{4B\cdot Д - C^2} = \frac{1}{2\cdot 369,6}\sqrt{4\cdot 369,4\cdot 282,53 - 2099,75^2} = 2,7\ \text{с}^{-1}.$$

Таким образом, имеем

$$\psi_{1,2} = -2,855 \pm 19,01i; \quad \psi_{3,4} = -2,84 \pm 2,7\ i.$$

2. Используя выражения [3], находим значения произвольных постоянных $C_1 ... C_4$:

$$C_1 = -\left|\frac{\dot{\varphi}_2}{t_P}\right|\cdot 0,00289\ \text{рад}; \quad C_2 = -\left|\frac{\dot{\varphi}_2}{t_P}\right|\cdot 0,00127\ \text{рад}; \quad C_3 = -C_1;\ C_4 = -\left|\frac{\dot{\varphi}_2}{t_P}\right|\cdot 0,0089\ \text{рад}.$$

3. Примем: $\dot{\varphi}_2^0 = 0,2$ рад/с; время разгона – 0,25, то есть:

$$\dot{\varphi}_2 = \dot{\varphi}_2^0\cdot i_П = 0,2\cdot 785 = 157\ \text{рад/с}.$$

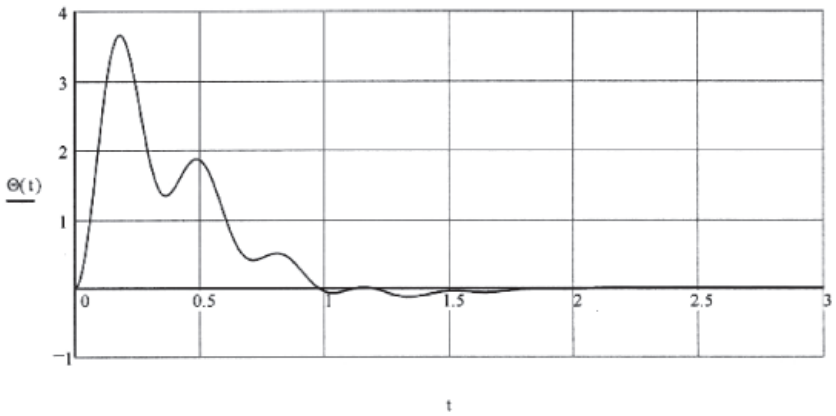
Тогда

$$C_1 = -\left|\frac{157}{0,25}\right|\cdot 0,00282 = -1,77\ \text{рад}; \quad C_2 = -0,7975\ \text{рад}; \quad C_3 = 1,77\ \text{рад}; \quad C_4 = 5,589\ \text{рад}.$$

На рис. 2 приведен график изменения деформации упругой связи «$C_{12}$», построенный по приведенным расчетам.

$N := 3 \qquad t := 0, 0.01 .. N \qquad n := 0 .. N\cdot 100 \qquad Max(x) := if(|max(x)| > |min(x)|, max(x), min(x))$

$\Theta(t) := e^{-2.855\cdot t}\cdot(-1.77\cdot\cos(19.01\cdot t) - 0.7975\cdot\sin(19.01\cdot t)) + e^{-2.84\cdot t}\cdot(1.77\cdot\cos(2.7\cdot t) + 5.589\cdot\sin(2.7\cdot t))$




$\Delta_n := \Theta(n\cdot 0.01) \qquad Max(\Delta) = 3.65381$ - максимум

*Рис. 2. График изменения деформации упругой связи «$C_{12}$»*

4. Определяем деформацию упругой связи и «$C_{12}$» (рис. 2).

$$\theta_1 = (\varphi_1 - \varphi_2) - \frac{E}{Д} = e^{-2,855}(-1,77\cos 19,01t - 0,7975\sin 19,01t +$$

$$+ e^{-2,84t}(1,77\cos 2,7t + 5,589\sin 2,7)t.$$

5. Находим максимальный динамический момент, воздействующий на силовую установку ВТМ:

$$M_{\text{Дин}}^{\text{Доб}} = C_{12}\theta_1 = 0{,}604 \cdot 3{,}65381 = 2{,}207 \text{ Н·м.}$$

6. Суммарный момент на силовую установку будет равен

$$M_{\Sigma} = M_C + M_{\text{Дин}}^{\text{Доб}} = 6{,}517 + 2{,}207 = 8{,}724 \text{ Н·м.}$$

Здесь

$$M_{\text{Дин}}^{\text{Доб}} = \frac{G_{\text{Д}}}{2} L \Big/ i_{\text{П}} = \frac{1023{,}25 \cdot 5}{785} = 6{,}517 \text{ Н·м.}$$

7. Снижение оборотов коленчатого вала произойдет

$$n' = n_{\text{Н}} - 9550\frac{N_{\text{Н}}}{M_{\Sigma}} = 1500 - 9550\frac{1{,}023}{8{,}724} = 380{,}14 \text{ об/мин,}$$

где

$$N_{\text{Н}} = M_C \cdot \dot{\varphi}_2 = 6{,}517 \cdot 157 = 1{,}023 \text{ кВт.}$$

8. Коэффициент динамичности нагрузки определяется как

$$K_{\text{Д}} = \frac{M_{\Sigma}}{M_C} = \frac{8{,}724}{6{,}517} = 1{,}34.$$

## Выводы

1. Процесс подъема дерева стрелой манипулятора бесчокерного трактора сопровождается значительной динамической нагрузкой на силовую установку и приводит к предельно допускаемому для снижения частоты вращения коленчатого вала.

2. Для уменьшения нагруженности силовой установки в данном режиме работы необходимо снижать скорость пускового режима или увеличивать время разгона динамической системы.

3. Предложенная математическая модель позволяет определить нагруженность силовой установки трактора в режимах подъема-опускания дерева стрелой манипулятора на этапе разработки конструкторской документации.

## Список литературы

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

3. Александров В.А. Конструирование и расчет машин и оборудования для лесосечных работ и нижних складов: учебное пособие / В.А. Александров, Н.Р. Шоль. – Ухта: УГТУ, 2004. – 114 с.

4. Александров В.А. Основы проектирования лесозаготовительных машини оборудова-ния: учебное пособие / Н.Р. Шоль, Шестаков Я.и., Багаутдинов И.Н. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2007. – 348 с.

5. Железко Б.Е. Основы теории и динамика автомобильных и тракторных двигателей: учеб. пособие. – Минск: Выш. шк., 1980. – 303 с.