

УДК 622.276.63

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ
ДЛЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА МЕХАНИЗМА ПОДЪЁМА
ПРИ БОЛЬШИХ ПЕРЕМЕЩЕНИЯХ ЕГО ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА**



**IMPROVEMENT OF THE CONTROL ALGORITHM
FOR THE ELECTRIC DRIVE OF THE LIFT MECHANISM
AT LARGE DISPLACEMENTS OF ITS EXECUTIVE BODY**

Добробаба Юрий Петрович

кандидат технических наук,
доцент,
доцент кафедры электроснабжения
промышленных предприятий,
Кубанский государственный технологический университет

Асланян Ярослав Вадимович

студент,
Кубанский государственный технологический университет

Аннотация. В работе предложен усовершенствованный алгоритм управления для электропривода механизма подъёма при больших перемещениях его исполнительного органа.

Ключевые слова: алгоритм, управление, электропривод, механизм подъёма, большие перемещения.

Dobrobaba Yury Petrovich

Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor,
Associate Professor of the Department
of Power Supply Industrial Enterprises,
Kuban State Technological University

Aslanyan Yaroslav Vadimovich

Student,
Kuban State Technological University

Annotation. The paper proposes an improved control algorithm for the electric drive of the lifting mechanism at large displacements of its actuator.

Keywords: algorithm, control, electric drive, lifting mechanism, large movements.

Подъёмные механизмы широко используются в промышленности и строительной отрасли. Электропривод механизма подъёма осуществляет перемещение груза по одному из алгоритмов управления: для малых, средних и больших перемещений. При этом загрузка подъёмного механизма обычно реализуется стандартная для любых перемещений.

В данной работе предлагается проанализировать процесс подъёма груза на большую высоту при различных загрузках механизма. Возможны следующие варианты.

Вариант первый. Поднимать партию груза при малой загрузке с больших количеством коротких циклов.

Вариант второй. Поднимать партию груза при большой загрузке с малым количеством данных циклов.

Целью работы является определить, при какой загрузке получится поднять партию груза за минимальное время

Математическая модель силовой части электропривода механизма подъёма:

$$C_M I_{\text{я}}(t) = R \cdot g m_{\text{гр}} + (J_0 + R^2 \cdot m_{\text{гр}}) \cdot \omega^{(1)}(t); \quad (1)$$

$$\omega(t) = \varphi^{(1)}(t), \quad (2)$$

где $I_{\text{я}}$ – ток якорной цепи электропривода, А; ω – угловая скорость исполнительного органа электропривода, $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$; φ – угол поворота исполнительного органа электропривода, рад; C_M – коэффициент пропорциональности между током и моментом двигателя, В · с; R – радиус барабана исполнительного органа электропривода, м; g – ускорение свободного падения $\frac{\text{м}}{\text{с}^2}$; $m_{\text{гр}}$ – масса груза, кг; J_0 – момент инерции электропривода, кг · м².

Критерий оптимизации:

$$F = \frac{m_{гр}}{T_{ц}},$$

где $T_{ц}$ – время цикла, с.

Ограничение контролируемых координат:

$$-I_{доп} \leq I_{я}(t) \leq I_{доп}; \quad (3)$$

$$-\omega_{доп} \leq \omega(t) \leq \omega_{доп}, \quad (4)$$

где $I_{доп}$ – допустимое значение тока якорной цепи электропривода, А; $\omega_{доп}$ – допустимое значение угловой скорости исполнительного органа электропривода, $\frac{рад}{с}$.

Начальные значения контролируемых координат:

$$\left. \begin{aligned} I_{я}(0) &= \frac{R \cdot gm_{гр}}{C_M}, \\ \omega(0) &= 0, \\ \varphi(0) &= \varphi_{нач}, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где $\varphi_{нач}$ – начальное значение угла поворота исполнительного органа электропривода, рад;

Конечные значения контролируемых координат:

$$\left. \begin{aligned} I_{я}(T_{ц}) &= \frac{R \cdot gm_{гр}}{C_M}, \\ \omega(T_{ц}) &= 0, \\ \varphi(T_{ц}) &= \varphi_{нач}, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где $\varphi_{кон}$ – конечное значение угла поворота исполнительного органа электропривода, рад.

На рисунке 1 представлена диаграмма подъёма груза на большую высоту. Этап 1. В интервале времени $0 \leq t \leq t_1$:

$$\begin{aligned} I_{я}(t) &= I_{доп}; \\ \omega^{(1)}(t) &= \frac{C_M I_{доп} - R \cdot gm_{гр}}{J_0 + R^2 \cdot m_{гр}}; \\ \omega(t) &= \frac{C_M I_{доп} - R \cdot gm_{гр}}{J_0 + R^2 \cdot m_{гр}} \cdot t; \\ \varphi(t) &= \varphi_{нач} + \frac{1}{2} \cdot \frac{C_M I_{доп} - R \cdot gm_{гр}}{J_0 + R^2 \cdot m_{гр}} \cdot t^2. \end{aligned}$$

При $t = t_1$.

$$\begin{aligned} \omega_1^{(1)} &= \frac{C_M I_{доп} - R \cdot gm_{гр}}{J_0 + R^2 \cdot m_{гр}}; \\ \omega_1 &= \frac{C_M I_{доп} - R \cdot gm_{гр}}{J_0 + R^2 \cdot m_{гр}} \cdot t_1; \\ \varphi_1 &= \varphi_{нач} + \frac{1}{2} \cdot \frac{C_M I_{доп} - R \cdot gm_{гр}}{J_0 + R^2 \cdot m_{гр}} \cdot t_1^2. \end{aligned}$$

Так как $\omega_1 = \omega_{доп}$, то:

$$\begin{aligned} t_1 &= \frac{(J_0 + R^2 \cdot m_{гр}) \cdot \omega_{доп}^2}{C_M I_{доп} - R \cdot gm_{гр}}; \\ \varphi_1 &= \varphi_{нач} + \frac{1}{2} \cdot \frac{(J_0 + R^2 \cdot m_{гр}) \cdot \omega_{доп}^2}{C_M I_{доп} - R \cdot gm_{гр}}. \end{aligned}$$

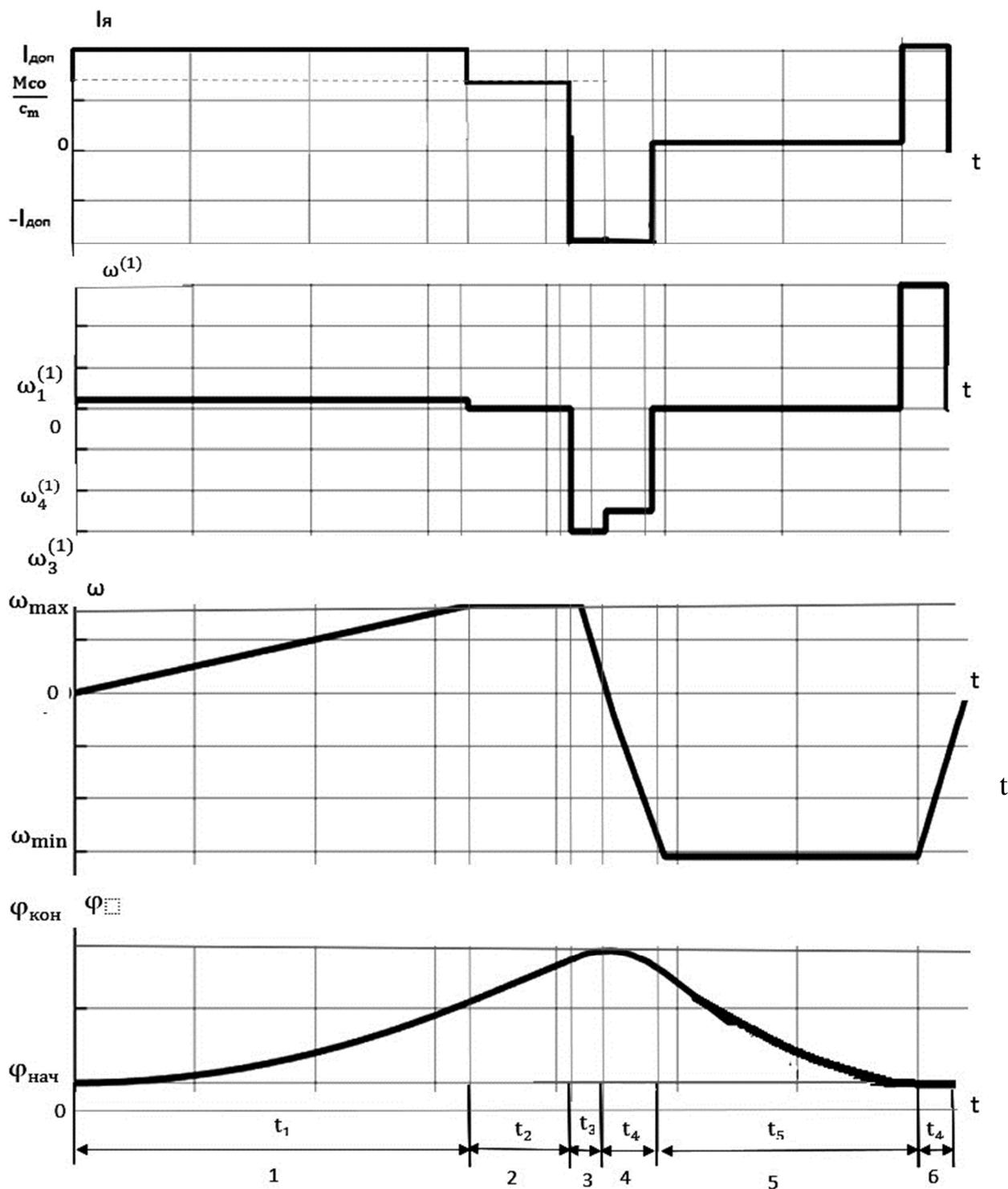


Рисунок 1 – Диаграмма подъёма груза на большую высоту

Этап 2. В интервале времени $t_1 \leq t \leq (t_1 + t_2)$:

$$I_{я}(t) = -\frac{R \cdot g m_{гр}}{C_M};$$

$$\omega^{(1)}(t) = 0;$$

$$\omega(t) = \omega_{доп};$$

$$\varphi(t) = \varphi_{нач} + \frac{1}{2} \cdot \frac{(J_0 + R^2 \cdot m_{гр}) \cdot \omega_{доп}^2}{C_M I_{доп} - R \cdot g m_{гр}} + \omega_{доп} \cdot (t - t_1).$$

При $t = t_1 + t_2$:

$$\omega_2^{(1)} = 0;$$

$$\omega_2 = \omega_{\text{доп}};$$

$$\varphi_2 = \varphi_{\text{нач}} + \frac{1}{2} \cdot \frac{(J_0 + R^2 \cdot m_{\text{гр}}) \cdot \omega_{\text{доп}}^2}{C_M I_{\text{доп}} - R \cdot g m_{\text{гр}}} + \omega_{\text{доп}} \cdot t_2.$$

Этап 3. В интервале времени $(t_1 + t_2) \leq t \leq (t_1 + t_2 + t_3)$:

$$I_{\text{я}}(t) = -I_{\text{доп}};$$

$$\omega^{(1)}(t) = -\frac{C_M I_{\text{доп}} + R \cdot g m_{\text{гр}}}{J_0 + R^2 \cdot m_{\text{гр}}};$$

$$\omega(t) = \omega_{\text{доп}} - \frac{C_M I_{\text{доп}} + R \cdot g m_{\text{гр}}}{J_0 + R^2 \cdot m_{\text{гр}}} \cdot (t - t_1 - t_2);$$

$$\begin{aligned} \varphi(t) = & \varphi_{\text{нач}} + \frac{1}{2} \cdot \frac{(J_0 + R^2 \cdot m_{\text{гр}}) \cdot \omega_{\text{доп}}^2}{C_M I_{\text{доп}} - R \cdot g m_{\text{гр}}} + \omega_{\text{доп}} \cdot t_2 + \omega_{\text{доп}} \cdot (t - t_1 - t_2) - \\ & - \frac{1}{2} \cdot \frac{C_M I_{\text{доп}} + R \cdot g m_{\text{гр}}}{J_0 + R^2 \cdot m_{\text{гр}}} \cdot (t - t_1 - t_2)^2. \end{aligned}$$

При $t = t_1 + t_2$:

$$\omega_3^{(1)} = -\frac{C_M I_{\text{доп}} + R \cdot g m_{\text{гр}}}{J_0 + R^2 \cdot m_{\text{гр}}};$$

$$\omega_3 = \omega_{\text{доп}} - \frac{C_M I_{\text{доп}} + R \cdot g m_{\text{гр}}}{J_0 + R^2 \cdot m_{\text{гр}}} \cdot t_3$$

$$\begin{aligned} \varphi_3 = & \varphi_{\text{нач}} + \frac{1}{2} \cdot \frac{(J_0 + R^2 \cdot m_{\text{гр}}) \cdot \omega_{\text{доп}}^2}{C_M I_{\text{доп}} - R \cdot g m_{\text{гр}}} + \omega_{\text{доп}} \cdot t_2 + \omega_{\text{доп}} \cdot t_3 - \\ & - \frac{1}{2} \cdot \frac{C_M I_{\text{доп}} + R \cdot g m_{\text{гр}}}{J_0 + R^2 \cdot m_{\text{гр}}} \cdot t_3^2. \end{aligned}$$

Так как $\omega_3 = 0$, то:

$$t_3 = \frac{(J_0 + R^2 \cdot m_{\text{гр}}) \cdot \omega_{\text{доп}}}{C_M I_{\text{доп}} + R \cdot g m_{\text{гр}}};$$

$$\varphi_1 = \varphi_{\text{нач}} + \frac{1}{2} \cdot \frac{(J_0 + R^2 \cdot m_{\text{гр}}) \cdot \omega_{\text{доп}}^2}{C_M I_{\text{доп}} - R \cdot g m_{\text{гр}}} + \frac{1}{2} \cdot \frac{(J_0 + R^2 \cdot m_{\text{гр}}) \cdot \omega_{\text{доп}}^2}{C_M I_{\text{доп}} + R \cdot g m_{\text{гр}}} + \omega_{\text{доп}}$$

Так как $\varphi_3 = \varphi_{\text{кон}}$, то:

$$t_2 = \frac{\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}}{\omega_{\text{доп}}} - \frac{1}{2} \cdot \frac{(J_0 + R^2 \cdot m_{\text{гр}}) \cdot \omega_{\text{доп}}}{C_M I_{\text{доп}} + R \cdot g m_{\text{гр}}} - \frac{1}{2} \cdot \frac{(J_0 + R^2 \cdot m_{\text{гр}}) \cdot \omega_{\text{доп}}}{C_M I_{\text{доп}} - R \cdot g m_{\text{гр}}}.$$

При этом:

$$\varphi_2 = \varphi_{\text{кон}} - \frac{1}{2} \cdot \frac{(J_0 + R^2 \cdot m_{\text{гр}}) \cdot \omega_{\text{доп}}^2}{C_M I_{\text{доп}} + R \cdot g m_{\text{гр}}}.$$

Если:

$$t_2 = 0, \text{ то } (\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) = \varphi_{\text{гр.2}};$$

$$\varphi_{\text{гр.2}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{(J_0 + R^2 \cdot m_{\text{гр}}) \cdot \omega_{\text{доп}}^2}{C_M I_{\text{доп}} + R \cdot g m_{\text{гр}}} + \frac{1}{2} \cdot \frac{(J_0 + R^2 \cdot m_{\text{гр}}) \cdot \omega_{\text{доп}}^2}{C_M I_{\text{доп}} - R \cdot g m_{\text{гр}}}.$$

Или:

$$\varphi_{\text{гр.2}} = \frac{C_M I_{\text{доп}}}{C_M I_{\text{доп}} + R \cdot g m_{\text{гр}}} \cdot \frac{J_0 + R^2 \cdot m_{\text{гр}}}{C_M I_{\text{доп}} - R \cdot g m_{\text{гр}}} \cdot \omega_{\text{доп}}^2.$$

Этап 4. В интервале времени $(t_1 + t_2 + t_3) \leq t \leq (t_1 + t_2 + t_3 + t_4)$:

$$\begin{aligned} I_{\text{я}}(t) &= -I_{\text{доп}}; \\ \omega^{(1)}(t) &= -\frac{C_{\text{М}}I_{\text{доп}}}{J_0}; \\ \omega(t) &= -\frac{C_{\text{М}}I_{\text{доп}}}{J_0} \cdot (t - t_1 - t_2 - t_3); \\ \varphi(t) &= \varphi_{\text{кон}} - \frac{1}{2} \cdot \frac{C_{\text{М}}I_{\text{доп}}}{J_0} \cdot (t - t_1 - t_2 - t_3)^2. \end{aligned}$$

При $t = t_1 + t_2 + t_3 + t_4$:

$$\begin{aligned} \omega_4^{(1)} &= -\frac{C_{\text{М}}I_{\text{доп}}}{J_0}; \\ \omega_4 &= -\frac{C_{\text{М}}I_{\text{доп}}}{J_0} \cdot t_4; \\ \varphi_4 &= \varphi_{\text{кон}} - \frac{1}{2} \cdot \frac{C_{\text{М}}I_{\text{доп}}}{J_0} \cdot t_4^2. \end{aligned}$$

Так как $\omega_4 = -\omega_{\text{доп}}$, то:

$$\begin{aligned} t_4 &= \frac{J_0 \omega_{\text{доп}}}{C_{\text{М}}I_{\text{доп}}}; \\ \varphi_4 &= \varphi_{\text{кон}} - \frac{1}{2} \cdot \frac{J_0 \omega_{\text{доп}}^2}{C_{\text{М}}I_{\text{доп}}}. \end{aligned}$$

Этап 5. В интервале времени $(t_1 + t_2 + t_3 + t_4) \leq t \leq (t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5)$:

$$\begin{aligned} I_{\text{я}}(t) &= 0; \\ \omega^{(1)}(t) &= 0; \\ \omega(t) &= -\omega_{\text{доп}}; \\ \varphi(t) &= \varphi_{\text{кон}} - \frac{1}{2} \cdot \frac{J_0 \omega_{\text{доп}}^2}{C_{\text{М}}I_{\text{доп}}} - \omega_{\text{доп}} \cdot (t - t_1 - t_2 - t_3 - t_4)^2. \end{aligned}$$

При $t = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5$:

$$\begin{aligned} \omega_5^{(1)} &= 0; \\ \omega_5 &= -\omega_{\text{доп}}; \\ \varphi_5 &= \varphi_{\text{кон}} - \frac{1}{2} \cdot \frac{J_0 \omega_{\text{доп}}^2}{C_{\text{М}}I_{\text{доп}}} - \omega_{\text{доп}} \cdot t_5. \end{aligned}$$

Этап 5. В интервале времени $(t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5) \leq t \leq (t_1 + t_2 + t_3 + +2t_4 + t_5)$:

$$\begin{aligned} I_{\text{я}}(t) &= -I_{\text{доп}}; \\ \omega^{(1)}(t) &= \frac{C_{\text{М}}I_{\text{доп}}}{J_0}; \\ \omega(t) &= -\omega_{\text{доп}} + \frac{C_{\text{М}}I_{\text{доп}}}{J_0} \cdot (t - t_1 - t_2 - t_3 - t_4 - t_5); \\ \varphi(t) &= \varphi_{\text{кон}} - \frac{1}{2} \cdot \frac{J_0 \omega_{\text{доп}}^2}{C_{\text{М}}I_{\text{доп}}} - \omega_{\text{доп}} \cdot t_5 - \omega_{\text{доп}} \cdot (t - t_1 - t_2 - t_3 - t_4 - t_5) + \\ &\quad + \frac{1}{2} \cdot \frac{C_{\text{М}}I_{\text{доп}}}{J_0} \cdot (t - t_1 - t_2 - t_3 - t_4 - t_5)^2. \end{aligned}$$

При $t = t_1 + t_2 + t_3 + +2t_4 + t_5$:

$$\omega_6^{(1)} = \frac{C_{\text{М}}I_{\text{доп}}}{J_0};$$

$$\omega_6 = -\omega_{\text{доп}} + \frac{C_M I_{\text{доп}}}{J_0} \cdot t_4;$$

$$\varphi_6 = \varphi_{\text{кон}} - \frac{1}{2} \cdot \frac{J_0 \omega_{\text{доп}}^2}{C_M I_{\text{доп}}} - \omega_{\text{доп}} \cdot t_5 - \omega_{\text{доп}} \cdot (t_4 + t_5) + \frac{1}{2} \cdot \frac{C_M I_{\text{доп}}}{J_0} \cdot t_4^2 .$$

Так как, то:

$$\omega_6 = 0.$$

$$t_4 = \frac{J_0 \omega_{\text{доп}}^2}{C_M I_{\text{доп}}}$$

Так как $\varphi_6 = \varphi_{\text{нач}}$, то:

$$(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) = \frac{J_0 \omega_{\text{доп}}^2}{C_M I_{\text{доп}}} + \omega_{\text{доп}} \cdot t_5.$$

$$t_5 = \frac{\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}}{\omega_{\text{доп}}} - \frac{J_0 \omega_{\text{доп}}}{C_M I_{\text{доп}}}.$$

Время цикла равно:

$$T_{\text{ц}} = t_1 + t_2 + t_3 + 2t_4 + t_5.$$

При этом:

$$\varphi_5 = \varphi_{\text{нач}} + \frac{1}{2} \cdot \frac{J_0 \omega_{\text{доп}}^2}{C_M I_{\text{доп}}}.$$

В работе рассматривается электропривод, имеющий следующие параметры:

$$C_M = 1,25 \text{ В} \cdot \text{с}; J_0 = 0,025 \text{ кг} \cdot \text{м}^2; R = 0,01 \text{ м};$$

$$I_{\text{доп}} = 8 \text{ А}; \omega_{\text{доп}} = 160 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

Результаты первого численного эксперимента при подъеме грузов с различной массой на высоту 1 м (угол поворота исполнительного органа электропривода 100 рад)

$$(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) = 100 \text{ рад} (s_{\text{кон}} - s_{\text{нач}}) = 1 \text{ м}.$$

Если $m_{\text{гр}} = 0 \text{ кг}$, то:

$$t_1 = 0,4 \text{ с}; t_2 = 0,225 \text{ с}; t_3 = 0,4 \text{ с};$$

$$t_4 = 0,4 \text{ с}; t_5 = 0,225 \text{ с}; T_{\text{ц}} = 2,05 \text{ с};$$

$$F = 0 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Если $m_{\text{гр}} = 10 \text{ кг}$, то:

$$t_1 = 0,462222222 \text{ с}; t_2 = 0,20479798 \text{ с}; t_3 = 0,378181818 \text{ с};$$

$$t_4 = 0,4 \text{ с}; t_5 = 0,225 \text{ с}; T_{\text{ц}} = 2,07020202 \text{ с};$$

$$F = 4,830446451 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Если $m_{\text{гр}} = 20 \text{ кг}$, то:

$$t_1 = 0,54 \text{ с}; t_2 = 0,175 \text{ с}; t_3 = 0,36 \text{ с};$$

$$t_4 = 0,4 \text{ с}; t_5 = 0,225 \text{ с}; T_{\text{ц}} = 2,1 \text{ с};$$

$$F = 9,523809524 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Если $m_{\text{гр}} = 30 \text{ кг}$, то:

$$t_1 = 0,64 \text{ с}; t_2 = 0,132692308 \text{ с}; t_3 = 0,344615384 \text{ с};$$

$$t_4 = 0,4 \text{ с}; t_5 = 0,225 \text{ с}; T_{ц} = 2,142307692 \text{ с};$$

$$F = 14,00359067 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Если $m_{гр} = 40 \text{ кг}$, то:

$$t_1 = 0,773333333 \text{ с}; t_2 = 0,072619048 \text{ с}; t_3 = 0,331428571 \text{ с};$$

$$t_4 = 0,4 \text{ с}; t_5 = 0,225 \text{ с}; T_{ц} = 2,202380952 \text{ с};$$

$$F = 18,16216217 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Если $m_{гр} = 50 \text{ кг}$, то:

$$t_1 = 0,948683298 \text{ с}; t_2 = 0,316227766 \text{ с}; t_3 = 0,4 \text{ с};$$

$$t_4 = 0,225 \text{ с}; T_{ц} = 2,289911064 \text{ с}; \omega_{\max} = 158,113883 \frac{\text{рад}}{\text{с}};$$

$$F = 21,83490913 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Если $m_{гр} = 60 \text{ кг}$, то:

$$t_1 = 1,113552873 \text{ с}; t_2 = 0,278388218 \text{ с}; t_3 = 0,4 \text{ с};$$

$$t_4 = 0,225 \text{ с}; T_{ц} = 2,416941091 \text{ с}; \omega_{\max} = 143,6842416 \frac{\text{рад}}{\text{с}};$$

$$F = 24,82476723 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Если $m_{гр} = 70 \text{ кг}$, то:

$$t_1 = 1,3460066 \text{ с}; t_2 = 0,23763541 \text{ с}; t_3 = 0,4 \text{ с};$$

$$t_4 = 0,225 \text{ с}; T_{ц} = 2,609236068 \text{ с}; \omega_{\max} = 126,2438117 \frac{\text{рад}}{\text{с}};$$

$$F = 26,82777571 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Если $m_{гр} = 71 \text{ кг}$, то:

$$t_1 = 1,375788175 \text{ с}; t_2 = 0,233320801 \text{ с}; t_3 = 0,4 \text{ с};$$

$$t_4 = 0,225 \text{ с}; T_{ц} = 2,660364976 \text{ с}; \omega_{\max} = 124,2923897 \frac{\text{рад}}{\text{с}};$$

$$F = 26,95408604 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Если $m_{гр} = 72 \text{ кг}$, то:

$$t_1 = 1,406413879 \text{ с}; t_2 = 0,228951096 \text{ с}; t_3 = 0,4 \text{ с};$$

$$t_4 = 0,225 \text{ с}; T_{ц} = 2,660364976 \text{ с}; \omega_{\max} = 122,2968591 \frac{\text{рад}}{\text{с}};$$

$$F = 27,06395575 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Если $m_{гр} = 73 \text{ кг}$, то:

$$t_1 = 1,438607866 \text{ с}; t_2 = 0,224522615 \text{ с}; t_3 = 0,4 \text{ с};$$

$$t_4 = 0,225 \text{ с}; T_{ц} = 2,6881305 \text{ с}; \omega_{\max} = 120,2551467 \frac{\text{рад}}{\text{с}};$$

$$F = 27,15641987 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Если $m_{гр} = 74 \text{ кг}$, то:

$$t_1 = 1,4725175 \text{ с}; t_2 = 0,220031345 \text{ с}; t_3 = 0,4 \text{ с};$$

$$t_4 = 0,225 \text{ с}; T_{ц} = 2,717548813 \text{ с}; \omega_{\max} = 118,164982 \frac{\text{рад}}{\text{с}};$$

$$F = 27,23042164 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Если $m_{гр} = 75$ кг, то:

$$t_1 = 1,508310313 \text{ с}; t_2 = 0,215472901 \text{ с}; t_3 = 0,4 \text{ с};$$

$$t_4 = 0,225 \text{ с}; T_{ц} = 2,748783215 \text{ с}; \omega_{max} = 116,0238702 \frac{\text{рад.}}{\text{с}};$$

$$F = 27,2847999 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Если $m_{гр} = 76$ кг, то:

$$t_1 = 1,5461781 \text{ с}; t_2 = 0,21084247 \text{ с}; t_3 = 0,4 \text{ с};$$

$$t_4 = 0,225 \text{ с}; T_{ц} = 2,782021 \text{ с}; \omega_{max} = 113,8290614 \frac{\text{рад.}}{\text{с}};$$

$$F = 27,31827412 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Если $m_{гр} = 77$ кг, то:

$$t_1 = 1,586341155 \text{ с}; t_2 = 0,206134726 \text{ с}; t_3 = 0,4 \text{ с};$$

$$t_4 = 0,225 \text{ с}; T_{ц} = 2,817475881 \text{ с}; \omega_{max} = 111,5775124 \frac{\text{рад.}}{\text{с}};$$

$$F = 27,3294265 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Если $m_{гр} = 78$ кг, то:

$$t_{41} = 1,629054383 \text{ с}; t_2 = 0,2013438 \text{ с}; t_3 = 0,4 \text{ с};$$

$$t_4 = 0,225 \text{ с}; T_{ц} = 2,855398183 \text{ с}; \omega_{max} = 109,2658427 \frac{\text{рад.}}{\text{с}};$$

$$F = 27,31668055 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Если $m_{гр} = 79$ кг, то:

$$t_1 = 1,674614383 \text{ с}; t_2 = 0,19646314 \text{ с}; t_3 = 0,4 \text{ с};$$

$$t_4 = 0,225 \text{ с}; T_{ц} = 2,896077523 \text{ с}; \omega_{max} = 106,8902798 \frac{\text{рад.}}{\text{с}};$$

$$F = 27,27827531 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Если $m_{гр} = 80$ кг, то:

$$t_1 = 1,723368794 \text{ с}; t_2 = 0,191485421 \text{ с}; t_3 = 0,4 \text{ с};$$

$$t_4 = 0,225 \text{ с}; T_{ц} = 2,939854216 \text{ с}; \omega_{max} = 104,4465926 \frac{\text{рад.}}{\text{с}};$$

$$F = 27,21223371 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Если $m_{гр} = 90$ кг, то:

$$t_1 = 2,541653005 \text{ с}; t_2 = 0,13377121 \text{ с}; t_3 = 0,4 \text{ с};$$

$$t_4 = 0,225 \text{ с}; T_{ц} = 3,700424215 \text{ с}; \omega_{max} = 74,75450016 \frac{\text{рад.}}{\text{с}};$$

$$F = 24,32153579 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Если $m_{гр} = 95$ кг, то:

$$t_1 = 3,668105778 \text{ с}; t_2 = 0,094053994 \text{ с}; t_3 = 0,4 \text{ с};$$

$$t_4 = 0,225 \text{ с}; T_{ц} = 4,787159772 \text{ с}; \omega_{max} = 53,16095331 \frac{\text{рад.}}{\text{с}};$$

$$F = 19,84475232 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Результаты первого численного эксперимента при подъёме грузов с различной массой на высоту 2 м (угол поворота исполнительного органа электропривода 200 рад)

$$(\varphi_{кон} - \varphi_{нач}) = 200 \text{ рад} (s_{кон} - s_{нач}) = 2 \text{ м}.$$

Если $m_{гр} = 0$ кг, то:

$$t_1 = 0,4 \text{ с}; t_2 = 0,85 \text{ с}; t_3 = 0,4 \text{ с};$$

$$t_4 = 0,4 \text{ с}; t_5 = 0,85 \text{ с}; T_{ц} = 3,3 \text{ с};$$

$$F = 0 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Если $m_{гр} = 10$ кг, то:

$$t_1 = 0,462222222 \text{ с}; t_2 = 0,82979798 \text{ с}; t_3 = 0,378181818 \text{ с};$$

$$t_4 = 0,4 \text{ с}; t_5 = 0,85 \text{ с}; T_{ц} = 3,32020202 \text{ с};$$

$$F = 3,011864923 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Если $m_{гр} = 20$ кг, то:

$$t_1 = 0,54 \text{ с}; t_2 = 0,8 \text{ с}; t_3 = 0,36 \text{ с};$$

$$t_4 = 0,4 \text{ с}; t_5 = 0,85 \text{ с}; T_{ц} = 3,35 \text{ с};$$

$$F = 5,970149254 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Если $m_{гр} = 30$ кг, то:

$$t_1 = 0,64 \text{ с}; t_2 = 0,757692308 \text{ с}; t_3 = 0,344615384 \text{ с};$$

$$t_4 = 0,4 \text{ с}; t_5 = 0,85 \text{ с}; T_{ц} = 3,392307692 \text{ с};$$

$$F = 8,843537416 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Если $m_{гр} = 40$ кг, то:

$$t_1 = 0,773333333 \text{ с}; t_2 = 0,697619048 \text{ с}; t_3 = 0,331428571 \text{ с};$$

$$t_4 = 0,4 \text{ с}; t_5 = 0,85 \text{ с}; T_{ц} = 3,452380952 \text{ с};$$

$$F = 11,5862069 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Если $m_{гр} = 50$ кг, то:

$$t_1 = 0,96 \text{ с}; t_2 = 0,61 \text{ с}; t_3 = 0,32 \text{ с};$$

$$t_4 = 0,4 \text{ с}; t_5 = 0,85 \text{ с}; T_{ц} = 3,54 \text{ с}; F = 14,12429379 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Если $m_{гр} = 60$ кг, то:

$$t_1 = 1,24 \text{ с}; t_2 = 0,475 \text{ с}; t_3 = 0,31 \text{ с};$$

$$t_4 = 0,4 \text{ с}; t_5 = 0,85 \text{ с}; T_{ц} = 2,416941091 \text{ с};$$

$$F = 16,32653061 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Если $m_{гр} = 70$ кг, то:

$$t_1 = 1,70667 \text{ с}; t_2 = 0,246078431 \text{ с}; t_3 = 0,30117647 \text{ с};$$

$$t_4 = 0,4 \text{ с}; t_5 = 0,85 \text{ с}; T_{ц} = 3,903921568 \text{ с};$$

$$F = 17,9306881 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Если $m_{гр} = 71$ кг, то:

$$t_1 = 1,771034483 \text{ с}; t_2 = 0,21430732 \text{ с}; t_3 = 0,300350877 \text{ с};$$

$$t_4 = 0,4 \text{ с}; t_5 = 0,85 \text{ с}; T_{ц} = 3,93569268 \text{ с};$$

$$F = 18,04002644 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Если $m_{гр} = 72$ кг, то:

$$t_1 = 1,84 \text{ с}; t_2 = 0,180232558 \text{ с}; t_3 = 0,299534883 \text{ с};$$

$$t_4 = 0,4 \text{ с}; t_5 = 0,85 \text{ с}; T_{ц} = 3,969767441 \text{ с};$$

$$F = 18,137083 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Если $m_{гр} = 73$ кг, то:

$$t_1 = 1,914074074 \text{ с}; t_2 = 0,1436 \text{ с}; t_3 = 0,298728323 \text{ с};$$

$$t_4 = 0,4 \text{ с}; t_5 = 0,85 \text{ с}; T_{ц} = 4,006401198 \text{ с};$$

$$F = 18,2208412 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Если $m_{гр} = 74$ кг, то:

$$t_1 = 1,993846154 \text{ с}; t_2 = 0,104111406 \text{ с}; t_3 = 0,297931034 \text{ с};$$

$$t_4 = 0,4 \text{ с}; t_5 = 0,85 \text{ с}; T_{ц} = 4,045888594 \text{ с};$$

$$F = 18,29017243 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Если $m_{гр} = 75$ кг, то:

$$t_1 = 2,08 \text{ с}; t_2 = 0,061428571 \text{ с}; t_3 = 0,297142857 \text{ с};$$

$$t_4 = 0,4 \text{ с}; t_5 = 0,85 \text{ с}; T_{ц} = 4,088571428 \text{ с};$$

$$F = 18,34381552 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Если $m_{гр} = 76$ кг, то:

$$t_1 = 2,173333 \text{ с}; t_2 = 0,0151515 \text{ с}; t_3 = 0,296363636 \text{ с};$$

$$t_4 = 0,4 \text{ с}; t_5 = 0,85 \text{ с}; T_{ц} = 4,1348485 \text{ с};$$

$$F = 18,38035911 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Если $m_{гр} = 77$ кг, то:

$$t_1 = 2,243425176 \text{ с}; t_2 = 0,291518525 \text{ с}; t_3 = 0,4 \text{ с};$$

$$t_4 = 0,85 \text{ с}; T_{ц} = 4,184944 \text{ с}; \omega_{\max} = 157,7944314 \frac{\text{рад}}{\text{с}};$$

$$F = 18,3993 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Если $m_{гр} = 78$ кг, то:

$$t_1 = 2,303830802 \text{ с}; t_2 = 0,284743132 \text{ с}; t_3 = 0,4 \text{ с};$$

$$t_4 = 0,85 \text{ с}; T_{ц} = 4,238574 \text{ с}; \omega_{\max} = 154,5252367 \frac{\text{рад}}{\text{с}};$$

$$F = 18,40242 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Если $m_{гр} = 79$ кг, то:

$$t_1 = 2,3682624 \text{ с}; t_2 = 0,277841 \text{ с}; t_3 = 0,4 \text{ с};$$

$$t_4 = 0,85 \text{ с}; T_{ц} = 4,29610321 \text{ с}; \omega_{\max} = 151,165683 \frac{\text{рад}}{\text{с}};$$

$$F = 18,3887575 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Если $m_{гр} = 80$ кг, то:

$$t_1 = 2,437211521 \text{ с}; t_2 = 0,27080128 \text{ с}; t_3 = 0,4 \text{ с};$$

$$t_4 = 0,85 \text{ с}; T_{ц} = 4,358012801 \text{ с}; \omega_{\max} = 147,7097892 \frac{\text{рад}}{\text{с}};$$

$$F = 18,356991 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Если $m_{гр} = 90 \text{ кг}$, то:

$$t_1 = 3,594440151 \text{ с}; t_2 = 0,18918106 \text{ с}; t_3 = 0,4 \text{ с};$$

$$t_4 = 0,85 \text{ с}; T_{ц} = 5,433621212 \text{ с}; \omega_{\max} = 105,718828 \frac{\text{рад}}{\text{с}};$$

$$F = 16,56353958 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Если $m_{гр} = 95 \text{ кг}$, то:

$$t_1 = 5,18748494 \text{ с}; t_2 = 0,133012434 \text{ с}; t_3 = 0,4 \text{ с};$$

$$t_4 = 0,85 \text{ с}; T_{ц} = 6,970497374 \text{ с}; \omega_{\max} = 75,18094116 \frac{\text{рад}}{\text{с}};$$

$$F = 13,62886963 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Результаты первого численного эксперимента при подъёме грузов с различной массой на высоту 4 м (угол поворота исполнительного органа электропривода 400 рад):

$$(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) = 400 \text{ рад} (s_{\text{кон}} - s_{\text{нач}}) = 4 \text{ м}.$$

Если $m_{гр} = 0 \text{ кг}$, то:

$$t_1 = 0,4 \text{ с}; t_2 = 2,1 \text{ с}; t_3 = 0,4 \text{ с};$$

$$t_4 = 0,4 \text{ с}; t_5 = 2,1 \text{ с}; T_{ц} = 5,8 \text{ с};$$

$$F = 0 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Если $m_{гр} = 10 \text{ кг}$, то:

$$t_1 = 0,462222222 \text{ с}; t_2 = 2,07979798 \text{ с}; t_3 = 0,378181818 \text{ с};$$

$$t_4 = 0,4 \text{ с}; t_5 = 2,1 \text{ с}; T_{ц} = 5,82020202 \text{ с};$$

$$F = 1,718153419 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Если $m_{гр} = 20 \text{ кг}$, то:

$$t_1 = 0,54 \text{ с}; t_2 = 2,05 \text{ с}; t_3 = 0,36 \text{ с};$$

$$t_4 = 0,4 \text{ с}; t_5 = 2,1 \text{ с}; T_{ц} = 5,85 \text{ с};$$

$$F = 3,418803419 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Если $m_{гр} = 30 \text{ кг}$, то:

$$t_1 = 0,64 \text{ с}; t_2 = 2,007692308 \text{ с}; t_3 = 0,344615384 \text{ с};$$

$$t_4 = 0,4 \text{ с}; t_5 = 2,1 \text{ с}; T_{ц} = 5,892307692 \text{ с};$$

$$F = 5,091383812 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Если $m_{гр} = 40 \text{ кг}$, то:

$$t_1 = 0,773333333 \text{ с}; t_2 = 1,947619048 \text{ с}; t_3 = 0,331428571 \text{ с};$$

$$t_4 = 0,4 \text{ с}; t_5 = 2,1 \text{ с}; T_{ц} = 5,952380952 \text{ с};$$

$$F = 6,72 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Если $m_{гр} = 50$ кг, то:

$$t_1 = 0,96 \text{ с}; t_2 = 1,86 \text{ с}; t_3 = 0,32 \text{ с};$$

$$t_4 = 0,4 \text{ с}; t_5 = 2,1 \text{ с}; T_{ц} = 6,04 \text{ с}; F = 8,278145695 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Если $m_{гр} = 60$ кг, то:

$$t_1 = 1,24 \text{ с}; t_2 = 1,725 \text{ с}; t_3 = 0,31 \text{ с};$$

$$t_4 = 0,4 \text{ с}; t_5 = 2,1 \text{ с}; T_{ц} = 6,403921568 \text{ с};$$

$$F = 9,71659919 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Если $m_{гр} = 70$ кг, то:

$$t_1 = 1,24 \text{ с}; t_2 = 1,496078431 \text{ с}; t_3 = 0,30117647 \text{ с};$$

$$t_4 = 0,4 \text{ с}; t_5 = 2,1 \text{ с}; T_{ц} = 6,403921568 \text{ с};$$

$$F = 10,93080221 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Если $m_{гр} = 75$ кг, то:

$$t_1 = 2,08 \text{ с}; t_2 = 1,311428571 \text{ с}; t_3 = 0,297142857 \text{ с};$$

$$t_4 = 0,4 \text{ с}; t_5 = 2,1 \text{ с}; T_{ц} = 6,588571428 \text{ с};$$

$$F = 11,38334779 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Если $m_{гр} = 76$ кг, то:

$$t_1 = 2,173333 \text{ с}; t_2 = 1,2651515 \text{ с}; t_3 = 0,296363636 \text{ с};$$

$$t_4 = 0,4 \text{ с}; t_5 = 2,1 \text{ с}; T_{ц} = 6,6348485 \text{ с};$$

$$F = 11,45467002 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Если $m_{гр} = 77$ кг, то:

$$t_1 = 2,274782609 \text{ с}; t_2 = 1,214812085 \text{ с}; t_3 = 0,29559322 \text{ с};$$

$$t_4 = 0,4 \text{ с}; t_5 = 2,1 \text{ с}; T_{ц} = 6,685187914 \text{ с};$$

$$F = 11,51800084 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Если $m_{гр} = 78$ кг, то:

$$t_1 = 2,38545454 \text{ с}; t_2 = 1,159857 \text{ с}; t_3 = 0,29483146 \text{ с};$$

$$t_4 = 0,4 \text{ с}; t_5 = 2,1 \text{ с}; T_{ц} = 6,740143002 \text{ с};$$

$$F = 11,57245476 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Если $m_{гр} = 79$ кг, то:

$$t_1 = 2,50666667 \text{ с}; t_2 = 1,09962756 \text{ с}; t_3 = 0,294078212 \text{ с};$$

$$t_4 = 0,4 \text{ с}; t_5 = 2,1 \text{ с}; T_{ц} = 6,800372439 \text{ с};$$

$$F = 11,61701079 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Если $m_{гр} = 80$ кг, то:

$$t_1 = 2,64 \text{ с}; t_2 = 1,0333333 \text{ с}; t_3 = 0,29333333 \text{ с};$$

$$t_4 = 0,4 \text{ с}; t_5 = 2,1 \text{ с}; T_{ц} = 6,86666667 \text{ с};$$

$$F = 11,65048544 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Если $m_{гр} = 81$ кг, то:

$$t_1 = 2,787368421 \text{ с}; t_2 = 0,96001745 \text{ с}; t_3 = 0,292596685 \text{ с};$$

$$t_4 = 0,4 \text{ с}; t_5 = 2,1 \text{ с}; T_{ц} = 6,939982553 \text{ с};$$

$$F = 11,6714991 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Если $m_{гр} = 82$ кг, то:

$$t_1 = 2,951111111 \text{ с}; t_2 = 0,878510379 \text{ с}; t_3 = 0,291868131 \text{ с};$$

$$t_4 = 0,4 \text{ с}; t_5 = 2,1 \text{ с}; T_{ц} = 7,021489621 \text{ с};$$

$$F = 11,67843356 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Если $m_{гр} = 83$ кг, то:

$$t_1 = 3,134117647 \text{ с}; t_2 = 0,787367406 \text{ с}; t_3 = 0,291147541 \text{ с};$$

$$t_4 = 0,4 \text{ с}; t_5 = 2,1 \text{ с}; T_{ц} = 7,112632594 \text{ с};$$

$$F = 11,66937824 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Если $m_{гр} = 84$ кг, то:

$$t_1 = 3,34 \text{ с}; t_2 = 0,68478261 \text{ с}; t_3 = 0,290434782 \text{ с};$$

$$t_4 = 0,4 \text{ с}; t_5 = 2,1 \text{ с}; T_{ц} = 7,2152174 \text{ с};$$

$$F = 11,64206086 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Если $m_{гр} = 85$ кг, то:

$$t_1 = 3,573333333 \text{ с}; t_2 = 0,568468468 \text{ с}; t_3 = 0,289729729 \text{ с};$$

$$t_4 = 0,4 \text{ с}; t_5 = 2,1 \text{ с}; T_{ц} = 7,33153153 \text{ с};$$

$$F = 11,59375768 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Если $m_{гр} = 90$ кг, то:

$$t_1 = 5,083306011 \text{ с}; t_2 = 0,267542421 \text{ с}; t_3 = 0,4 \text{ с};$$

$$t_4 = 2,1 \text{ с}; T_{ц} = 8,250848433 \text{ с}; \omega_{\max} = 149,5090003 \frac{\text{рад}}{\text{с}};$$

$$F = 10,90796913 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Если $m_{гр} = 95$ кг, то:

$$t_1 = 7,336211556 \text{ с}; t_2 = 0,188107988 \text{ с}; t_3 = 0,4 \text{ с};$$

$$t_4 = 2,1 \text{ с}; T_{ц} = 10,42431954 \text{ с}; \omega_{\max} = 106,3219066 \frac{\text{рад}}{\text{с}};$$

$$F = 9,113304675 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

По результатам трёх численных экспериментов на рисунке 2 представлены зависимости интенсивности подъёма груза F от массы загрузки $m_{гр}$.

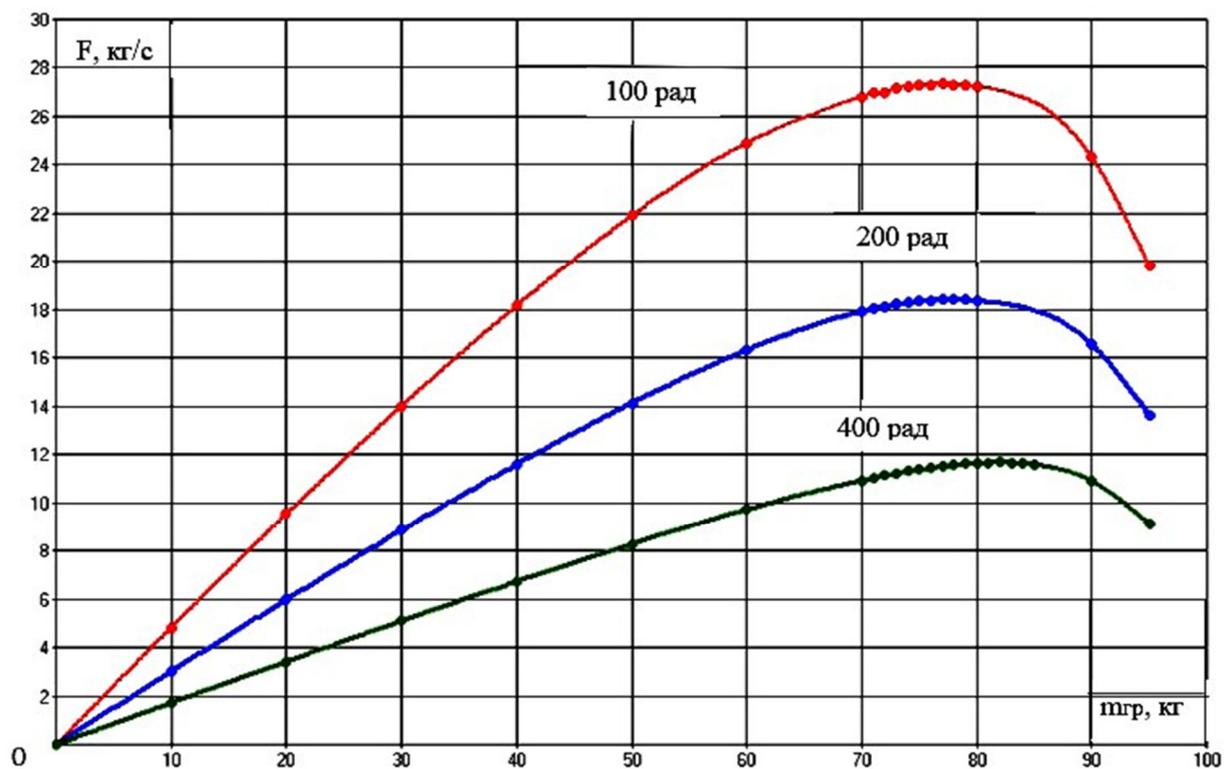


Рисунок 2

Выводы.

Для механизма подъёма грузов на большую высоту оптимальная загрузка остаётся величиной постоянной.