

УДК 699.86

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



**IMPROVEMENT OF THE CONTROL ALGORITHM FOR THE ELECTRIC  
DRIVE OF THE LIFT MECHANISM WITH MEDIUM MOVEMENTS  
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 средних перемещениях его исполнительного органа.

**Ключевые слова:** алгоритм, управление, электропривод, механизм подъёма, средние перемещения.

**Dobrobaba Yury Petrovich**

Candidate of Technical Sciences,  
Associate Professor,  
Associate Professor of 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 lift mechanism at medium displacements of its actuator.

**Keywords:** algorithm, control, electric drive, lifting mechanism, mean 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 среднюю высоту при различных загрузках механизма. Возможны следующие варианты.

Вариант первый. Поднимать партию груза при малой загрузке с большим 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;  $\omega$  – угловая скорость исполнительного органа электропривода,  $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$ ;  $\varphi$  – 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 · м<sup>2</sup>.

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,  $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$ .

Начальные значения контролируемых координат:

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

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

Конечные значения контролируемых координат:

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

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

Этап 1. В интервале времени  $0 \leq t \leq t_1$ :

$$I_{я}(t) = I_{доп};$$

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

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

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

При  $t = t_1$ :

$$\omega_1^{(1)} = \frac{C_M I_{доп} - R \cdot g m_{гр}}{J_0 + R^2 \cdot m_{гр}};$$

$$\omega_1 = \frac{C_M I_{доп} - R \cdot g m_{гр}}{J_0 + R^2 \cdot m_{гр}} \cdot t_1;$$

$$\varphi_1 = \varphi_{нач} + \frac{1}{2} \cdot \frac{C_M I_{доп} - R \cdot g m_{гр}}{J_0 + R^2 \cdot m_{гр}} \cdot t_1^2.$$

На рисунке 1 представлена диаграмма подъёма груза на среднюю высоту.

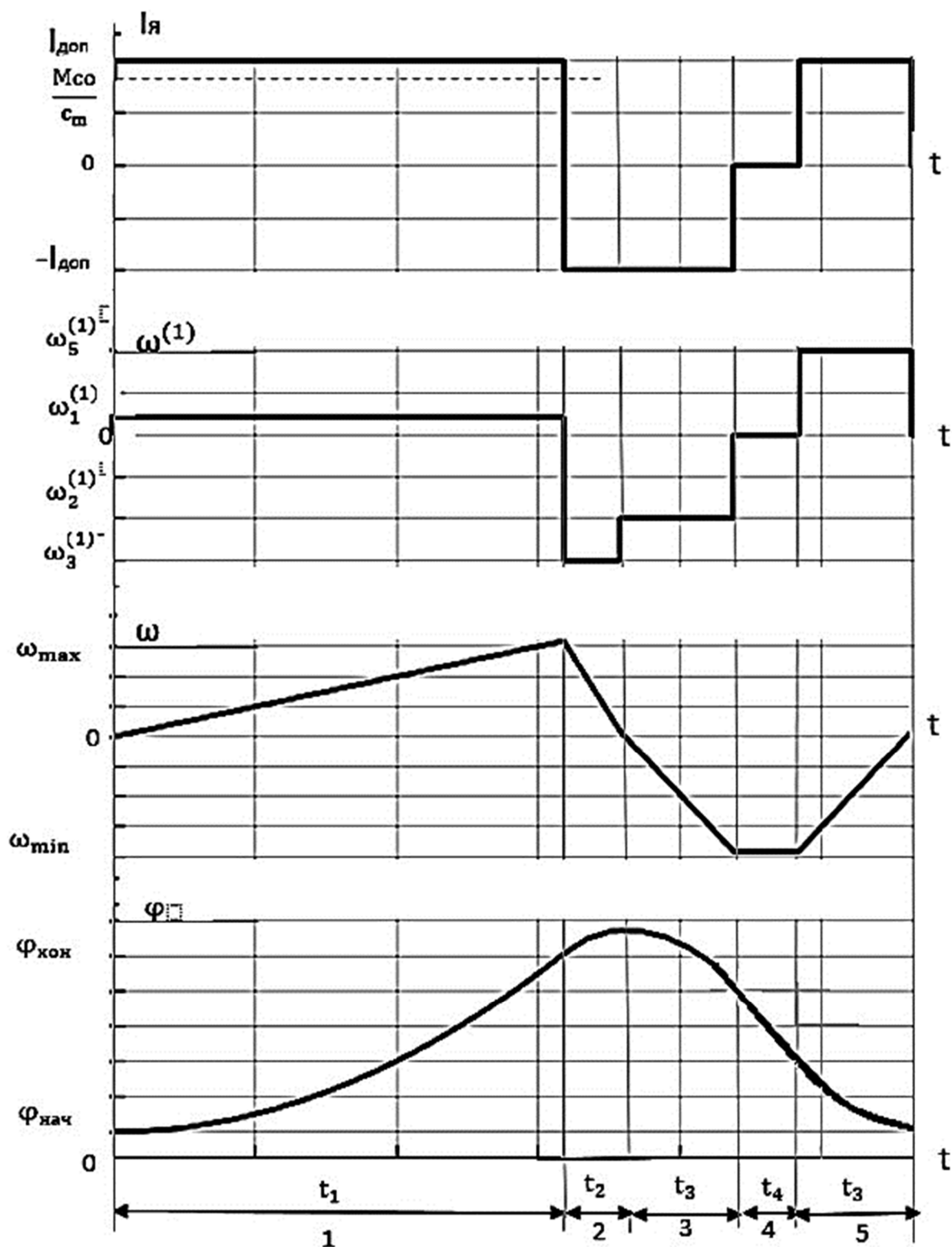


Рисунок 1 – Диаграмма подъёма груза на среднюю высоту

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

$$I_{я}(t) = -I_{доп};$$

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

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

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

При  $t = t_1 + t_2$ :

$$\omega_2^{(1)} = - \frac{C_M I_{\text{доп}} + R \cdot g m_{\text{гр}}}{J_0 + R^2 \cdot m_{\text{гр}}};$$

$$\omega_2 = \frac{C_M I_{\text{доп}} - R \cdot g m_{\text{гр}}}{J_0 + R^2 \cdot m_{\text{гр}}} \cdot t_1 - \frac{C_M I_{\text{доп}} + R \cdot g m_{\text{гр}}}{J_0 + R^2 \cdot m_{\text{гр}}} \cdot t_2;$$

$$\varphi_2 = \varphi_{\text{нач}} + \frac{1}{2} \cdot \frac{C_M I_{\text{доп}} - R \cdot g m_{\text{гр}}}{J_0 + R^2 \cdot m_{\text{гр}}} \cdot t_1^2 + \frac{C_M I_{\text{доп}} - R \cdot g m_{\text{гр}}}{J_0 + R^2 \cdot m_{\text{гр}}} \cdot t_1 \cdot t_2 - \frac{1}{2} \cdot \frac{C_M I_{\text{доп}} + R \cdot g m_{\text{гр}}}{J_0 + R^2 \cdot m_{\text{гр}}} \cdot t_2^2.$$

Так как  $\omega_2 = 0$ , то:

$$t_2 = \frac{C_M I_{\text{доп}} - R \cdot g m_{\text{гр}}}{C_M I_{\text{доп}} + R \cdot g m_{\text{гр}}} \cdot t_1.$$

Так как  $\varphi_2 = \varphi_{\text{кон}}$ , то:

$$(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) = \frac{C_M I_{\text{доп}} - R \cdot g m_{\text{гр}}}{C_M I_{\text{доп}} + R \cdot g m_{\text{гр}}} \cdot \frac{C_M I_{\text{доп}}}{J_0 + R^2 \cdot m_{\text{гр}}} \cdot t_1^2;$$

$$t_1 = \sqrt{\frac{C_M I_{\text{доп}} + R \cdot g m_{\text{гр}}}{C_M I_{\text{доп}} - R \cdot g m_{\text{гр}}} \cdot \frac{J_0 + R^2 \cdot m_{\text{гр}}}{C_M I_{\text{доп}}} \cdot (\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}})};$$

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

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

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

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

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

$$\omega^{(1)}(t) = - \frac{C_M I_{\text{доп}}}{J_0};$$

$$\omega(t) = - \frac{C_M I_{\text{доп}}}{J_0} \cdot (t - t_1 - t_2);$$

$$\varphi(t) = \varphi_{\text{кон}} - \frac{1}{2} \cdot \frac{C_M I_{\text{доп}}}{J_0} \cdot (t - t_1 - t_2)^2.$$

При  $t = t_1 + t_2 + t_3$ :

$$\omega_3^{(1)} = - \frac{C_M I_{\text{доп}}}{J_0};$$

$$\omega_3 = - \frac{C_M I_{\text{доп}}}{J_0} \cdot t_3;$$

$$\varphi_3 = \varphi_{\text{кон}} - \frac{1}{2} \cdot \frac{C_M I_{\text{доп}}}{J_0} \cdot t_3^2.$$

Так как  $\omega_3 = -\omega_{\text{доп}}$ , то:

$$t_3 = \frac{J_0 \omega_{\text{доп}}}{C_M I_{\text{доп}}};$$

$$\varphi_3 = \varphi_{\text{кон}} - \frac{1}{2} \cdot \frac{J_0 \omega_{\text{доп}}^2}{C_M I_{\text{доп}}}.$$

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

$$I_{я}(t) = 0;$$

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

$$\omega(t) = -\omega_{доп};$$

$$\varphi(t) = \varphi_{кон} - \frac{1}{2} \cdot \frac{J_0 \omega_{доп}^2}{C_M I_{доп}} - \omega_{доп} \cdot (t - t_1 - t_2 - t_3).$$

При  $t = t_1 + t_2 + t_3 + t_4$ :

$$\omega_4^{(1)} = 0;$$

$$\omega_4 = -\omega_{доп};$$

$$\varphi_4 = \varphi_{кон} - \frac{1}{2} \cdot \frac{J_0 \omega_{доп}^2}{C_M I_{доп}} - \omega_{доп} \cdot t_4.$$

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

$$I_{я}(t) = I_{доп};$$

$$\omega^{(1)}(t) = \frac{C_M I_{доп}}{J_0};$$

$$\omega(t) = -\omega_{доп} + \frac{C_M I_{доп}}{J_0} \cdot (t - t_1 - t_2 - t_3 - t_4);$$

$$\begin{aligned} \varphi(t) = \varphi_{кон} - \frac{1}{2} \cdot \frac{J_0 \omega_{доп}^2}{C_M I_{доп}} - \omega_{доп} \cdot t_4 - \omega_{доп} \cdot (t - t_1 - t_2 - t_3 - t_4) + \\ + \frac{1}{2} \cdot \frac{C_M I_{доп}}{J_0} \cdot (t - t_1 - t_2 - t_3 - t_4)^2. \end{aligned}$$

При  $t = t_1 + t_2 + 2t_3 + t_4$ :

$$\omega_5^{(1)} = \frac{C_M I_{доп}}{J_0};$$

$$\omega_5 = -\omega_{доп} + \frac{C_M I_{доп}}{J_0} \cdot t_3;$$

$$\varphi_5 = \varphi_{кон} - \frac{1}{2} \cdot \frac{J_0 \omega_{доп}^2}{C_M I_{доп}} - \omega_{доп} \cdot (t_3 + t_4) + \frac{1}{2} \cdot \frac{C_M I_{доп}}{J_0} \cdot t_3^2.$$

Так как  $t_3 = \frac{J_0 \omega_{доп}^2}{C_M I_{доп}}$ , то:

$$\omega_5 = 0.$$

Так как  $\varphi_5 = \varphi_{нач}$ , то:

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

$$t_4 = \frac{\varphi_{кон} - \varphi_{нач}}{\omega_{доп}} - \frac{J_0 \omega_{доп}}{C_M I_{доп}}.$$

Время цикла равно:

$$T_{ц} = t_1 + t_2 + 2t_3 + t_4.$$

При этом:

$$\varphi_4 = \varphi_{нач} + \frac{1}{2} \cdot \frac{J_0 \omega_{доп}^2}{C_M I_{доп}}.$$

Если  $t_4 = 0$ , то  $(\varphi_{кон} - \varphi_{нач}) = \varphi_{гр.1}$ ;

$$\varphi_{гр.1} = \frac{J_0}{C_M I_{доп}} \omega_{доп}^2.$$

Если  $\omega_{\max} = \omega_{\text{доп}}$ , то  $(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) = \varphi_{\text{гр.2}}$ ;

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

В работе рассматривается электропривод, имеющий следующие параметры:

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

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

При этом первое граничное значение угла поворота равно  $\varphi_{\text{гр.1}} = 64$  рад, оно не зависит от величины поднимаемого груза.

В таблице 1 представлены результаты численного эксперимента по определению зависимости  $\varphi_{\text{гр.2}}$  от величины поднимаемого груза.

**Таблица 1** – Результаты численного эксперимента по определению зависимости  $\varphi_{\text{гр.2}}$  от величины поднимаемого груза

$\varphi_{\text{гр.2}}$ , рад	$m_{\text{гр}}$ , кг	$t_1$ , с	$t_2$ , с	$T_{\text{ц}}$ , с	$\omega_{\max}$ , $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$	$F$ , кг/с
64	0	0,4	0,4	1,6	160	0
67,23232	10	0,462222	0,378182	1,280808	160	7,807571
72	20	0,54	0,36	1,4	160	14,28571
78,76923	30	0,64	0,344615	1,569231	160	19,11765
88,38095	40	0,773333	0,331429	1,809524	160	22,10526
102,4	50	0,96	0,32	2,16	160	23,14815
124	60	1,24	0,31	2,7	160	22,22222
160,6275	70	1,706667	0,301176	3,615686	160	19,36009
234,6667	80	2,64	0,293333	5,466667	160	14,63415
458,1053	90	5,44	0,286316	11,05263	160	8,142857
905,8462	95	11,04	0,283077	22,24615	160	4,270401

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

### Выводы.

Таким образом, в зависимости от величины перемещения существуют три различных диаграммы подъёма груза:

- а) вид первый для малых перемещений;
- б) вид второй для средних перемещений;
- в) вид третий для больших перемещений.