

УДК 62

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



**IMPROVEMENT OF THE CONTROL ALGORITHM FOR THE ELECTRIC DRIVE  
OF THE LIFTING MECHANISM AT SMALL DISPLACEMENTS  
OF ITS ACTUATOR**

**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.** 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 малую высоту при различных загрузках механизма.

**Ключевые слова:** подъёмные механизмы, строительная отрасль, электропривод механизма подъёма, анализ процесса подъёма груза на малую высоту.

**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.** Lift mechanisms are widely used in industry and construction industry. Electric actuator of lifting mechanism moves load according to one of control algorithms: for small, medium and large displacements. At the same time the loading of the lifting mechanism is usually standard for all movements.

In this paper we propose to analyze the process of lifting cargo to a low height at different loadings of the mechanism.

**Keywords:** hoisting mechanisms, construction industry, electric drive of the hoisting mechanism, analysis of the process of lifting loads to a low height.

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 малую 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

$$C_M I_A(t) = R \cdot g m_{гп} + (J_0 + R^2 \cdot m_{гп}) \cdot \omega^{(1)}(t); \quad (1)$$

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

где  $I_A$  – 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 мо-

ментом двигателя, В·с;  $R$  – радиус барабана исполнительного органа электропривода, м;  $g$  – ускорение свободного падения  $\frac{м}{с^2}$ ;  $m_{гр}$  – 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,  $\frac{рад}{с}$ .

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:

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

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

На рисунке 1 представлена диаграмма подъёма груза на малую 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  $t = t_1$

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

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

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

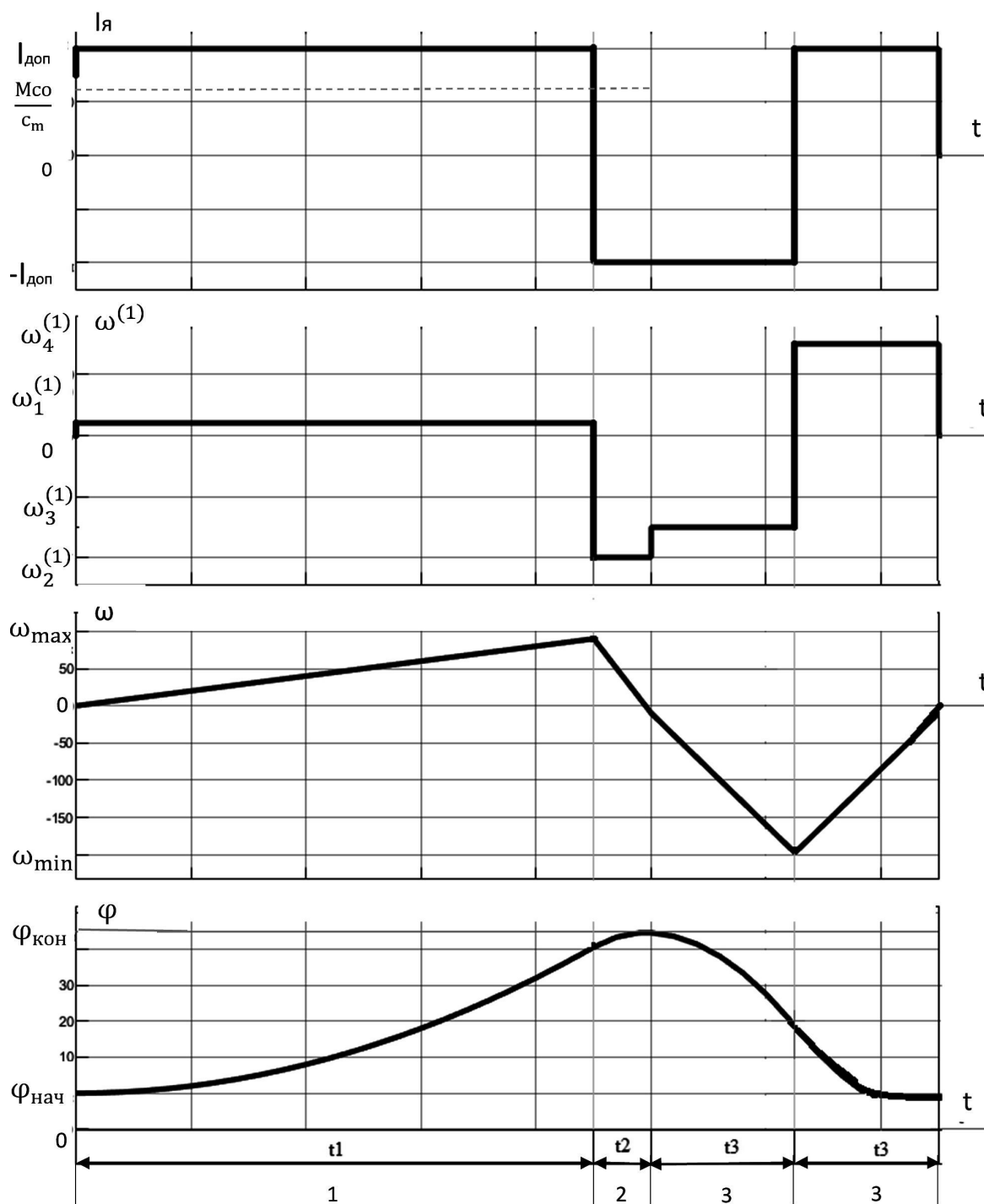


Рисунок 1 – Диаграмма подъёма груза на малую высоту

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

$$I_{\text{я}}(t) = -I_{\text{доп}}$$

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

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

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

При  $t = t_1 + t_2$ :

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

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

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

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  $\omega_1 = \omega_{\text{макс}}$ , то

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

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  $t = t_1 + t_2 + t_3$

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

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

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

Этап 4. В интервале времени  $(t_1 + t_2 + t_3) \leq t \leq (t_1 + t_2 + 2t_3)$ :

$$I_n(t) = I_{\text{доп}};$$

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

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

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

При  $t = t_1 + t_2 + 2t_3$

$$\omega_4^{(1)} = \frac{C_M I_{\text{доп}}}{J_0};$$

$$\omega_4 = 0;$$

$$\varphi_4 = \varphi_{\text{кон}} - \frac{C_M I_{\text{доп}}}{J_0} \cdot t_3^2.$$

Так как  $\varphi_4 = \varphi_{\text{нач}}$ , то

$$t_3 = \sqrt{\frac{J_0}{C_M I_{\text{доп}}} \cdot (\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}})}.$$

Время цикла равно:

$$T_{\text{ц}} = t_1 + t_2 + 2t_3.$$

Так как  $\omega_3 = \omega_{\text{min}}$ , то

$$\omega_{\text{min}} = -\sqrt{\frac{C_M I_{\text{доп}}}{J_0} \cdot (\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}})}.$$

Если  $\omega_{\text{min}} = -\omega_{\text{доп}}$ , то  $(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) = \varphi_{\text{гр.1}}$ ;

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

В работе рассматривается электропривод, имеющий следующие параметры:

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

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

Результаты первого численного эксперимента при подъёме грузов с различной массой на высоту 0,25 м (угол поворота исполнительного органа электропривода 25 рад) и опускании пустого крюка приведены в таблице 1.

$$(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) = 25 \text{ рад}; (S_{\text{кон}} - S_{\text{нач}}) = 0,25 \text{ м}.$$

При этом для всех масс груза параметры диаграммы перемещения остаются постоянной

$$t_3 = 0,25 \text{ с}; \omega_{\text{min}} = -100 \text{ рад/с}.$$

Таблица 1

$m_{гр}$ , кг	$t_1$ , с	$t_2$ , с	$T_{ц}$ , с	$\omega_{max}$ , $\frac{рад}{с}$	F, кг/с
0	0,25	0,25	1	100	0
10	0,281859	<b>0,230612</b>	<b>1,01247</b>	97,5665	9,87683
20	0,316876	<b>0,213017</b>	<b>1,029893</b>	94,35865	19,41949
30	0,35819	0,19543	1,053617	90,31512	28,473341
40	0,407415	<b>0,177951</b>	<b>1,085366</b>	85,41663	36,85392
50	0,4681	<b>0,160222</b>	<b>1,12832</b>	79,57701	44,31358
60	0,546546972	0,14179934	1,188346312	72,63785559	50,49033215
70	0,655404	0,12062	1,277466	64,31149781	54,79598
71	0,668852	0,119982	1,288834	63,38469552	55,08855
72	0,682917	0,117877	1,300793	62,43808362	55,35084
73	0,697648	0,115746	1,313394	61,47080406	55,58118
74	0,713105638	0,113587659	1,326693297	60,48192261	55,77777485
75	0,729354199	0,111399921	1,34075412	59,47041928	55,93866833
76	0,746468173	0,10918081	1,355648983	58,43517724	56,06170987
77	0,764531993	0,106928161	1,371460154	57,37496977	56,14454038
78	0,783642186	0,104639594	1,38828178	56,28844486	56,1845593
79	0,803909706	0,102312485	1,406222191	55,17410685	56,17888873
80	0,825463	0,099944	1,425407	54,03029453	56,12433
90	1,164336	0,073003	1,737339	40,40930295	51,80337
95	1,553625	0,055515	2,10914	31,07249588	45,04205

Результаты первого численного эксперимента при подъеме грузов с различной массой на высоту 0,5 м (угол поворота исполнительного органа электропривода 50 рад) и опускании пустого крюка приведены в таблице 2.

$$(\varphi_{кон} - \varphi_{нач}) = 50 \text{ рад}; (S_{кон} - S_{нач}) = 0,5 \text{ м.}$$

Таблица 2

$m_{гр}$ , кг	$t_1$ , с	$t_2$ , с	$T_{ц}$ , с	$\omega_{max}$ , $\frac{рад}{с}$	F, кг/с
1	2	3	4	5	6
0	0,353553391	0,353553391	1,414213562	141,4213562	0
10	0,397804395	0,326793775	1,431704951	138,0075249	6,984679344
<b>20</b>	0,448130445	0,30125157	1,456488796	133,443288	13,73165386
30	0,506557565	0,276375302	1,490039648	127,7248717	20,13369244
40	0,576171575	0,251661148	1,534939504	120,797351	26,05965896
50	0,661993425	0,226588353	1,595688559	112,5388822	31,33443535
60	0,77293414	0,20053455	1,680575471	102,7254405	35,70205625
70	0,926880942	0,172621955	1,806609678	90,95019241	38,74660966
71	0,945900008	0,169679669	1,822686458	89,63949605	38,95349071
72	0,965789832	0,166702935	1,839599549	88,30078466	39,13895285
73	0,986623643	0,16368957	1,857419994	86,9328448	39,30182739
74	1,008483664	0,160637208	1,876227653	85,53435524	39,44084283
75	1,0314626	0,157543279	1,89611266	84,1038735	39,5546117

Окончание таблицы 2

1	2	3	4	5	6
75	1,0314626	0,157543279	1,89611266	84,1038735	39,5546117
76	1,055665414	0,154404983	1,917177178	82,63982017	39,64161522
77	1,081211514	0,151219255	1,93953755	81,14046039	39,70018523
78	1,108237408	0,147982733	1,963326922	79,60388212	39,72848288
79	1,136900009	0,144691704	1,988698494	78,0279702	39,72447318
80	1,167380734	0,141342062	2,015829577	76,41037531	39,68589454
90	1,646619547	0,103241821	2,456968149	57,14738427	36,63051149
95	2,197157254	0,078510539	2,982774574	43,94314509	31,84954063

Результаты первого численного эксперимента при подъёме грузов с различной массой на высоту 0,64 м (угол поворота исполнительного органа электропривода 64 рад) и опускании пустого крюка приведены в таблице 3.

$$(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) = 64 \text{ рад}; (S_{\text{кон}} - S_{\text{нач}}) = 0,64 \text{ м.}$$

Таблица 3

$m_{\text{гр}}$ кг	$t_1$ с	$t_2$ с	$T_{\text{ц}}$ с	$\omega_{\text{макс}}$ <u>рад</u> с	F, кг/с
0	0,4	0,4	1,6	160	0
10	0,450064297	0,36972495	1,619789248	156,1376907	6,17364266
20	0,507001722	0,340827245	1,647828967	150,9738462	12,13718195
30	0,573104463	0,31268296	1,685787423	144,5041967	17,79583807
40	0,651863725	0,284722087	1,736585812	136,6666016	23,03370195
50	0,748960063	0,256355458	1,805315521	127,3232108	27,69598965
60	0,874475155	0,226878944	1,901354099	116,2205689	31,55645759
70	1,048646079	0,195299448	2,043945527	102,8983965	34,24748805
71	1,070163696	0,191970631	2,062134327	101,4155128	34,43034679
72	1,092666463	0,188602842	2,081269305	99,90093379	34,59427371
73	1,116237229	0,185193608	2,101430837	98,3532865	34,73823583
74	1,14096902	0,181740254	2,122709275	96,77107618	34,86110928
75	1,166966718	0,178239873	2,145206591	95,15267085	34,9616677
76	1,194349077	0,174689296	2,169038374	93,49628358	35,03856867
77	1,223251189	0,171085057	2,194336247	91,79995163	35,09033774
78	1,253827498	0,16742335	2,221250848	90,06151177	35,11534956
79	1,286255529	0,163699977	2,249955506	88,27857096	35,11180546
80	1,320740533	0,159910289	2,280650822	86,4484712	35,07770643
90	1,862937356	0,116804786	2,779742143	64,65488472	32,37710384
95	2,48579967	0,088824535	3,374624205	49,7159934	28,1512827

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

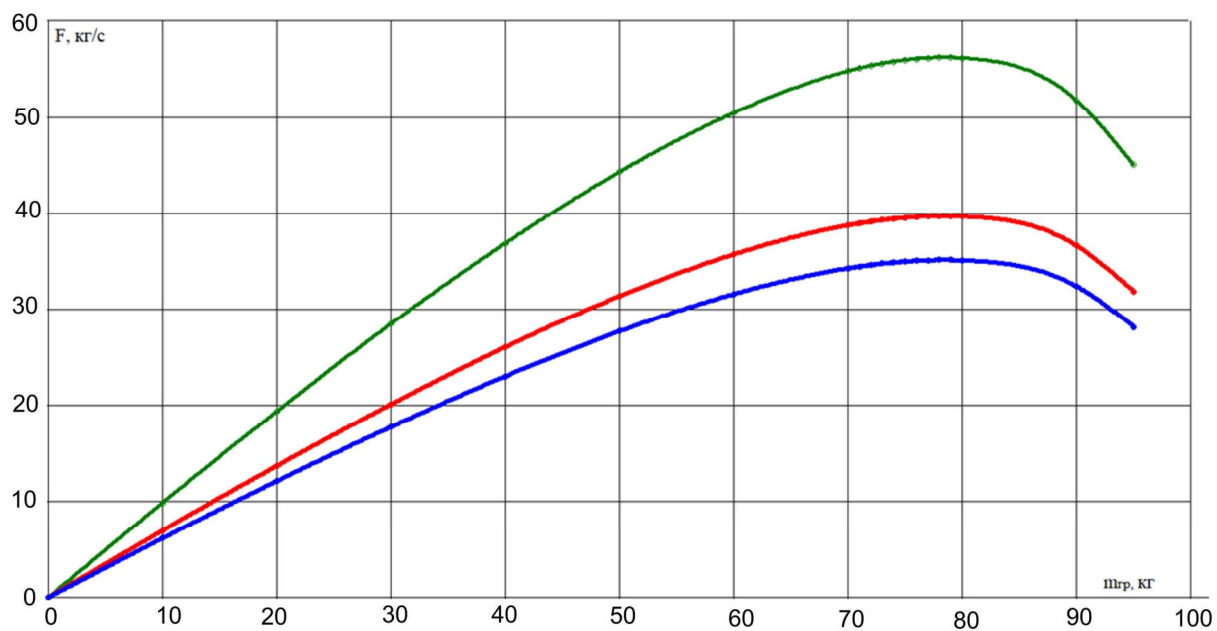


Рисунок 2

### Выводы

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