

К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРО- ДВИГАТЕЛЯ ПОДЪЕМНОЙ УСТАНОВКИ

И. К. ХРУСТАЛЕВ

(Представлено проф., докт. техн. наук Балашевым И. А.)

Эффективная мощность

Подъемная установка при эксплуатации выполняет ряд чередующихся операций по подъему или спуску груза. При завершении каждой подъемной операции происходит останов движущейся системы, а затем, после паузы, движение ее совершается в противоположном направлении. Следовательно, за каждую операцию скорость сосудов изменяется от нуля до максимального значения, а затем, оставаясь постоянной в течение некоторого промежутка времени, падает от этого максимального значения до нуля. Это изменение скорости приводит к изменению движущегося усилия, развиваемого подъемным электродвигателем (рис. 1). Таким образом, подъемный электродвигатель работает длительно при повторно-кратковременной переменной нагрузке.

Для выбора мощности электродвигателей, работающих при продолжительной переменной нагрузке, существует несколько методов. Суть всех этих методов сводится к тому, чтобы выбранный двигатель, работая по заданному графику нагрузки, не нагрелся выше допустимой температуры. В этом случае чаще пользуются методом определения мощности электродвигателя по току.

Эффективный или среднеквадратичный ток, как известно, определяется по формуле

$$I_{эф} = \sqrt{\frac{\int I^2 dt}{T_g}} \quad (1)$$

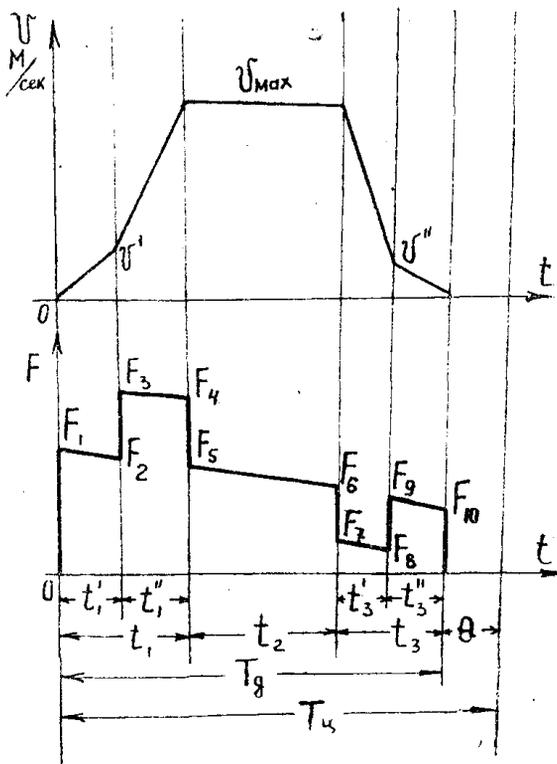


Рис. 1. Диаграммы скорости и движущих усилий скиповой подъемной установки.

среднеквадратичному или эффективному

Практически удобнее пользоваться расчетными диаграммами нагрузки $M=f(t)$ или $F=\varphi(t)$. На самом деле, с достаточной для практики точностью можно считать, что ток двигателя пропорционален его вращающему моменту M , а для подъемных установок с постоянным радиусом навивки каната $I \equiv M \equiv F$. Для этого случая, пользуясь нагрузочной диаграммой $F=f(t)$, получим выражение для определения эффективного движущего усилия, развиваемого двигателем на окружности барабана. При этом

$$F_{эф} = \sqrt{\frac{\int_0^n F^2 dt}{T_э}} \quad (2)$$

и

$$P_{эф} = \frac{F_{эф} V_{max}}{102 \eta_{зп}} = \frac{V_{max}}{102 \eta_{зп}} \sqrt{\frac{\int_0^n F^2 dt}{T_э}} \quad (3)$$

Здесь V_{max} — максимальная скорость движения сосудов,
 $\eta_{зп}$ — к.п.д. зубчатой передачи от двигателя к барабанам,
 $T_э$ — эффективное время цикла работы электродвигателя.

Для определения $T_э$ в технической литературе [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 и др.] приводятся следующие выражения:

$$T_{э1} = t_1 + t_2 + t_3 + \theta, \quad (4)$$

$$T_{э2} = t_1 + t_2 + t_3 + \frac{1}{3} \theta, \quad (5)$$

$$T_{э3} = \frac{2}{3}(t_1 + t_3) + t_2 + \frac{1}{2} \theta, \quad (6)$$

$$T_{э4} = \frac{2}{3}(t_1 + t_3) + t_2 + \frac{1}{3} \theta, \quad (7)$$

$$T_{э5} = \frac{1}{2}(t_1 + t_3) + t_2 + \frac{1}{3} \theta, \quad (8)$$

$$T_{э6} = \frac{1}{2}(t_1 + t_3) + t_2 + \frac{1}{4} \theta, \quad (9)$$

где t_1 — период пуска, t_3 — период останова,
 t_2 — период установившейся работы двигателя и θ — пауза.

Произведем краткий сравнительный анализ формул (4) ÷ (9) для определения $T_э$.

Охлаждение двигателя во время пауз, в период разгона и останова проходит в более тяжелых условиях, чем при постоянной скорости, поэтому перед слагаемыми $t_1 + t_3$ и θ должны быть коэффициенты менее единицы. С этой точки зрения наиболее приемлемы формулы (6) ÷ (9).

Для окончательного сравнения формул (4) ÷ (9) сделаем некоторые пояснения.

Известно, что окончательный выбор подъемного электродвигателя производится после проверки принятого по эффективной мощности двигателя

на перегрузочную способность. При этом $P_n \geq P_{эф}$ и $\gamma = \frac{F_{max}}{F_n} \leq \gamma_0$, где:

Т а б л и ц а 1

Данные о скиповых подъемных установках и запроектированном режиме их работы

Наименование установки	H м	Q т	Y' м/сек	V'' м/сек	Y ^{*1)} _{max} м/сек	j ¹⁾ _{max} м/сек	Время, сек.						pH	Движущие усилия на окружности барабана, кг									
							t ₁ '	t ₁ ''	t ₂	t ₃ '	t ₃ ''	θ		F ₁ ¹⁾	F ₂	F ₃	F ₄	F ₅	F ₆	F ₇	F ₈	F ₉	F ₁₀
I	141	3	1,2	1,0	4,8	0,75	3,12	4,8	23,3	3,8	3,74	8,0	338	4815	4805	5755	5681	3731	3150	550	491	2394	2387
II	238	4	1,2	1,0	6,0	0,75	3,12	6,4	31	6,25	3,74	8,0	900	7400	73900	9190	9010	5310	3890	-50	-230	2390	2380
III	400	6	1,2	1,0	7,3	0,55	3,1	11,3	42	11,5	3,7	8	2040	12380	12360	14420	13980	8280	5474	250	-100	2560	2520
IV	505	6	1,2	1,0	6,71	0,85	4,7	6,48	59	6	5	10	2580	9338	9338	13031	13031	6900	6900	48	48	5457	5457

1) Обозначение величин принято такое же, как и на рис. 1.

P_n — номинальная мощность принятого электродвигателя, F_{max} — максимальное движущее усилие, подсчитанное из условий заданного режима работы установки, F_n — номинальное усилие двигателя и γ_0 — его допустимая перегрузка.

Имея в виду в качестве привода машины асинхронный электродвигатель и его работу при пуске и останове с включенным металлическим реостатом в цепи ротора, допустимая перегрузка должна быть [12] $\gamma_0 = (0,75 \div 0,8) m$, где $m = \frac{M_{max}}{M_n}$ — перегрузочная способность двигателя из его паспортных данных.

Ввиду того, что для асинхронных подъемных электродвигателей обычно $m = 1,95 \div 2,3$, $\gamma_0 = 1,5 \div 1,8$.

Далее проведем сравнительные расчеты для конкретных примеров, взяв для этого различные условия работы скиповых подъемов, встречающиеся в практике. Данные об этих подъемах приведены в табл. 1.

Сравнительные расчетные данные о $T_{э}$, $P_{эф}$, и $\gamma = \frac{F_{max}}{F_{эф}}$ приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Расчетные данные	I	II	III	IV
$T_{э1} = t_1 + t_2 + t_3 + \theta$ сек	46,76	58,61	79,6	91,18
$T_{э2} = t_1 + t_2 + t_3 + \frac{1}{3} \theta$ сек	41,43	53,28	74,27	84,51
$T_{э3} = \frac{2}{3} (t_1 + t_3) + t_2 + \frac{1}{2} \theta$ сек	38,9	49,7	68,3	80,83
$T_{э4} = \frac{2}{3} (t_1 + t_3) + t_2 + \frac{1}{3} \theta$ сек	37,57	48,37	67,0	79,16
$T_{э5} = \frac{1}{2} (t_1 + t_3) + t_2 + \frac{1}{2} \theta$ сек	33,7	43,47	59,47	74,23
$T_{э6} = \frac{1}{2} (t_1 + t_3) + t_2 + \frac{1}{4} \theta$ сек	33,03	42,8	58,8	73,4
$P_{эф1}$ квт	171	312	594	495
$P_{эф2}$ квт	182	326	614	516
$P_{эф3}$ квт	186	340	639	530
$P_{эф4}$ квт	190	344	646	532
$P_{эф5}$ квт	201	362	686	550
$P_{эф6}$ квт	204	365	690	556
$\gamma_1^1) = \frac{F_{max}}{F_n}$	1,72	1,89	1,89	1,87
γ_2	1,62	1,8	1,83	1,81
γ_3	1,58	1,73	1,76	1,76
γ_4	1,55	1,71	1,74	1,75
γ_5	1,47	1,63	1,64	1,69
γ_6	1,45	1,61	1,63	1,68
$\frac{P_{эф.6}}{P_{эф.1}} \cdot 100\%$	119	117	116	113

1) Перегрузочную способность двигателя следовало бы определять по выражению $\gamma = \frac{F_{max}}{F_n}$, но так как мы не оперируем с конкретными двигателями, поэтому не знаем F_n ,

эффективное же усилие $F_{эф} \leq F_n$. Следовательно, при точном выборе двигателя $\frac{F_{max}}{F_{эф}} \approx \frac{F_{max}}{F_n}$

Данные табл. 2 показывают, что для одних и тех же условий эффективная мощность двигателя, подсчитанная при различных рекомендуемых в литературе T_s , разнится на 13 ÷ 19%. Отсюда следует, что и принятые по $P_{эф}$ стандартные мощности P_n будут различными. Так например, для случая 1 по $P_{эф1}$ можно принять $P_n' = 320$ квт, а по $P_{эф6}$ $P_n'' = 400$ квт. При этом двигатель с мощностью P_n' будет иметь недопустимо большую перегрузку $\gamma = 1,84$.

Соответственно для случая II $P_n' = 600$ квт, $P_n'' = 710$ квт и $\gamma' = 1,87$.

Из табл. 2 также видно, что наиболее приемлемые перегрузки подъемного электродвигателя получаются в том случае, когда T_s подсчитано по формулам (8) и (9), и что перегрузки подъемного двигателя, как правило, никогда не выходят за пределы допустимых, в том случае, когда T_s подсчитано по формуле (9).

Исходя из сказанного, на наш взгляд, было бы полезным изъять из употребления формулы (4) ÷ (8) для определения эффективного времени при подсчетах мощности подъемных электродвигателей, так как обилие формул, дающих различающиеся в больших пределах результаты при определении одной и той же величины, вводит в заблуждение проектировщиков и инженерно-технических работников шахт и рудников. Тем более, что все эти формулы эмпирические. Для определения T_s целесообразно пользоваться формулой (9).

$$T_s = \frac{1}{2}(t_1 + t_3) + t_2 + \frac{1}{4}\theta. \quad (9)$$

Ориентировочная мощность

При проектировании подъемной установки необходимо иметь расчеты по определению ориентировочной мощности двигателя, по которой производится предварительный его выбор по каталогам. Не имея предварительно выбранного подъемного электродвигателя, проектировщик не может задать режим работы и произвести расчет динамики подъема, так как при определении динамических усилий надо знать массу движущихся частей установки, приведенную к окружности барабана, последнюю же невозможно определить, не имея махового момента электродвигателя.

Обычно ориентировочная мощность подъемного электродвигателя определяется по следующей формуле:

$$P_{op} = \rho \frac{kQH}{102T\eta_{зп}}, \quad (10)$$

где

k — коэффициент шахтных сопротивлений, Q — вместимость сосуда в кг, H — высота подъема в м, T — время движения, определяемое из заданных H , Q и производительности, $\eta_{зп}$ — к.п.д. зубчатой передачи, ρ — характеристика динамического режима.

Для определения ρ проф. Г. М. Еланчик рекомендует пользоваться графиками $\rho = \varphi(T)$, приведенными в его книге [2]. Однако принятые по этим графикам значения ρ дают чрезвычайно завышенные значения ориентировочной мощности двигателя. Более лучшие значения ρ получаются по графикам В. Б. Уманского [12], но здесь до определения ρ необходимо найти степень статической неуравновешенности установки $\delta = \frac{\rho H}{kQ}$ и константу

динамического режима $c = \frac{Hm}{kQT^2}$. Как видим, последний метод определения ρ сложен и не дает точных результатов до нахождения массы m , приведенной к окружности барабана, которая, как было указано выше, определяется после предварительного выбора подъемного электродвигателя.

Практически, при определении ρ по указанным выше причинам не пользуются ни графиками Уманского, ни графиками Еланчика, а в зависимости от глубины подъема принимают $\rho = 1,6 \div 1,8$. Это, в свою очередь, облегчая расчет, дает неточные результаты.

Нами, при исследовании режима работы неуравновешенной скиповой подъемной установки [12], подсчитаны значения ρ для наивыгоднейших значений производительности, высоты подъема H , Q и множителя скорости α . На основании этих подсчетов построена зависимость $\rho = \varphi(H)$ для неопрокидных скипов, которая показана на рис. 2. Значения ρ , полученные по этой зависимости, дают лучшие результаты при определении P_{op} , что видно из следующих сравнительных расчетов (табл. 3) для неуравновешенной скиповой подъемной установки.

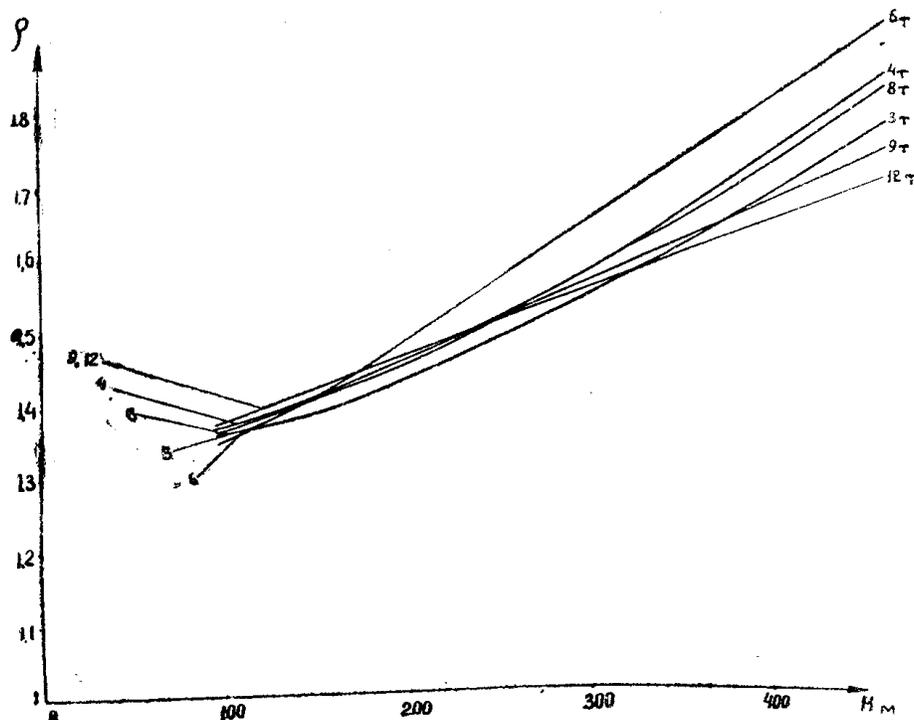


Рис. 2. Зависимость характеристики динамического режима ρ от Q и H —для неуравновешенного скипового подъема.

Таблица 3
Сравнительные расчеты по определению P_{op}

Величины	Примеры		
	I	II	III
Время движения T сек	38,76	50,61	71,6
Q т	3	4	6
H м	141	238	400
$\eta_{эл}$	0,92	0,92	0,92
ρ^1	$\rho' = 1,9; \rho'' = 1,4$	$\rho' = 2,03; \rho'' = 1,56$	$\rho' = 1,95; \rho'' = 1,82$
$\rho^1)_{op}$ квт	$P'_{op} = 255; P''_{op} = 190$	$P'_{op} = 468; P''_{op} = 360$	$P'_{op} = 7,99; P''_{op} = 741$

1) ρ' и ρ'_{op} — значения ρ , найденные по графикам проф Г. М. Еланчик, и мощность, подсчитанная по этим значениям.
 ρ'' и ρ''_{op} — значения ρ , найденные по этим значениям.

Как видим, значения ориентировочных мощностей, подсчитанных по формуле (10) при значениях ρ , найденных по графикам рис. 2, близки таковым, подсчитанных по формуле (3).

Исходя из сказанного, необходимо рекомендовать, при определении P_{op} по формуле (10), принимать значения ρ на основании графиков, изображенных на рис. 2.

Для сугубо ориентировочных и сравнительных расчетов значения ориентировочных мощностей подъемных двигателей можно определять исходя из режима работы установки. Как известно, окончательный выбор подъемного электродвигателя производится после проверки принятого по $P_{эф}$ двигателя на перегрузочную способность.

Исходя из этого, ориентировочная мощность может быть определена по следующей формуле:

$$P_{op} = \frac{F_{max} V_{max}}{102 \eta_{дв} \gamma}, \quad (11)$$

где γ — перегрузка двигателя.

Максимальное движущее усилие F_{max} , как известно, бывает в период пуска, и оно равно:

$$F_{max} = kQ + pH + mj_{max}. \quad (12)$$

Подставим вместо m ее значение $m = \mu Q$, где μ — коэффициент массивности.

Тогда
$$F_{max} = kQ + pH + \mu j_{max} Q = (k + \mu j_{max}) Q + pH.$$

Для скиповых подъемов с высотой подъема 100 ÷ 400 м можно ориентировочно принимать $\mu = 1$, тогда для неуравновешенного скипового подъема

$$F_{max} = (k + j_{max}) Q + pH \quad (13)$$

и

$$F_{max} = (k + j_{max}) Q \quad (14)$$

для уравновешенного подъема.

Т а б л и ц а 4

Сравнительные расчеты по определению P_{op}

Расчетные величины	I	II	III	IV
V_{max} , м/сек	4,8	6,0	7,3	6,71
H	141	238	400	505
Q	3	4	6	6
k	1,15	1,15	1,15	1,15
Tg сек	38,76	50,61	71,6	88,6
$\eta_{дв}$	0,92	0,92	0,92	0,92
$F_{max\ op}$, кг	6038	8500	12240	12000
$P_{эф}$, кВт	204	365	690	556
$P''_{op} = \rho \frac{kQH}{102 Tg \eta_{дв}}$, кВт	190	360	741	830*)
$P_{op} = \frac{F_{max\ op} V_{max}}{145}$, кВт	200	353	630	555

*) При определении P''_{op} взято из графиков проф. Г. М. Еланчик.

Из табл. 4 видно, что значения ориентировочных мощностей, подсчитанных по формуле (16), близки таковым подсчитанным по формуле (10), при ρ , взятых из графиков автора (рис. 2) и подсчитанных по формуле (3), при $T_{э}$, определенном по формуле (9).

Принимая для клетевых подъемных установок при глубине подъема $H = 100 \div 400$ м, $\mu = 1,5$, получим

$$F'_{\max} = (k + 1,5 j_{\max}) Q + \rho H. \quad (15)$$

Далее, принимая $\eta_{эп} = 0,92$ и $\gamma_g^{1*}) = 1,55$, получим:

$$\rho_o = \frac{F_{\max} V_{\max}}{145}. \quad (16)$$

Для выявления пригодности формулы (16) определяем сравнительные расчеты из взятых нами примеров. Указанные расчеты приведены в табл. 4.

Выводы

1. При выборе подъемного электродвигателя по эффективной нагрузке необходимо учитывать условия ухудшенного его охлаждения в периоды пуска, останова и пауз, поэтому эффективное время охлаждения должно приниматься меньше времени цикла $T_{э} < T_{ц}$.

2. Для определения $T_{э}$ имеется большое разнообразие формул, дающих различные результаты как $T_{э}$, так и $P_{эф}$, а это, в свою очередь, вводит в заблуждение проектантов, а иногда и приводит к ошибкам при выборе мощности подъемного электродвигателя.

Лучшие результаты при определении $T_{э}$ дает формула (9), поэтому и необходимо рекомендовать ее для применения.

3. Для определения $P_{ср}$ по формуле (10) необходимо обратить внимание на точное нахождение ρ . При этом рекомендуем пользоваться графиками, показанными на рис. 2.

4. Для ориентировочных сравнительных расчетов по определению мощности подъемного электродвигателя хорошие результаты дает формула (16). Ею удобно пользоваться для подсчетов при определении возможного максимального ускорения, необходимой мощности при изменении режима работы находящейся в эксплуатации подъемной установки и определения мощности двигателя при изменении высоты подъема и производительности установки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Попов В. К. Основы электропривода. Госэнергоиздат, 1951.
2. Еланчик Г. М. Рудничные подъемные установки. Гостоптехиздат, 1941.
3. Василевский М. Н. Асинхронный привод шахтных подъемных машин. Углетехиздат, 1953.
4. Живов А. Г. Привод и автоматика шахтных подъемных машин. ГОНТИМЛ, 1952.
5. Герман А. П., Шклярский Ф. Н. Рудничные подъемные установки. Углетехиздат, 1947.
6. Киселев В. И. Горная механика. Metallurgizdat, 1947.
7. Пак В. С. Горная механика, часть I. ГОНТИ, 1932.
8. Шклярский Ф. Н. Физико-механические свойства основы электрического рудничного подъема. Углетехиздат, 1950.
9. Карташев А. Н. Горная механика. Рудничные подъемные машины. ОНТИ, 1937.
10. Маймин С. Р., Шишков П. Ф. Сборник задач и упражнений по горной электротехнике. Углетехиздат, 1955.
11. Хрусталева И. К. О режиме работы неуравновешенной скиповой подъемной установки. Известия ТПИ, т. 88, 1956.
12. Уманский В. Б. Техничко-экономический расчет электрических подъемных машин в книге В. Филлипп, Электрические подъемные машины. Донуголь, 1929.

^{1*)} Низкая допустимая перегрузочная способность принята исходя из того, что нам неизвестен конкретный электродвигатель и точное значение μ .