

## МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ АСИНХРОННОГО ПРИВОДА ШАХТНОЙ ПОДЪЕМНОЙ МАШИНЫ

В. Д. ПЕТУНОВ

(Представлено научно-технической конференцией горного факультета)

Установившаяся практика проектирования асинхронного привода шахтных подъемных машин без достаточной взаимной увязки решает вопросы, связанные с выбором диаграммы скорости, пускового реостата и двигателя. Предлагаемая методика проектирования учитывает реальные условия эксплуатации подъемных машин и позволяет производить расчет диаграммы скорости в зависимости от роторных сопротивлений и перегрузочной способности двигателя.

Предварительно выбирается двигатель со скоростью вращения, соответствующей максимальной скорости движения подъемных сосудов, и номинальной мощностью

$$P_n \approx \frac{\rho \kappa Q v_m}{102 \eta_p}, \quad (1)$$

где  $\rho$  — постоянная динамического режима;

$\kappa$  — коэффициент шахтных сопротивлений;

$Q$  — вес полезного груза, кг;

$v_m$  — максимальная скорость движения подъемных сосудов, м/сек;

$\eta_p$  — к. п. д. редуктора.

Постоянная динамического режима зависит от скорости и высоты подъема. Для Карагандинского и Кузнецкого угольных бассейнов наиболее распространены скорости от 4 до 7,5 м/сек. При таких скоростях рекомендуем принимать в зависимости от глубины подъема следующие значения постоянной динамического режима:

высота подъема, м	до 200	200 — 300	300 — 400	400 — 500	более 500
постоянная дина- мического режима	1,45	1,40	1,35	1,30	1,25

Магнитная станция выбирается в зависимости от перегрузочной способности двигателя, так чтобы при пуске иметь одинаковые толчки момента во время переключения ступеней реостата. Поэтому рекомендуем принимать число контакторов:

перегрузочная способность двигателя	1,8—2,0	2,1—2,2	2,3—2,5	более 2,5
наименьшее число контакторов	6	7	8	9

Учитывая условия плавного пуска, магнитные станции с числом контакторов менее шести не должны применяться. Более чем 9 контакторов рекомендовать также нельзя, так как громоздкие магнитные станции являются ненадежными в работе.

Соппротивления предварительных ступеней рассчитываются из действительных условий работы подъемной установки. Первая ступень должна обеспечивать кинематическую подтяжку системы, а также достаточно плавный переход в режим торможения противовключением. Соппротивление этой ступени

$$R_1 = \frac{R_n}{0,3 \div 0,5}, \quad (2)$$

где  $R_n$  — номинальное соппротивление ротора, *ом*.

В случае скипового подъема вторая ступень предназначена для импульсного дотягивания сосуда в конце подъемного цикла без наложения механического тормоза. Соппротивление второй ступени

$$R_2 = \frac{R_n (v_0 - 0,5 v_{вх})}{v_0 (\mu j_{вх} + \gamma_{ст-к})}, \quad (3)$$

где  $v_0$  — скорость подъема, соответствующая синхронной скорости двигателя, *м/сек*;

$v_{вх}$  — принятая скорость входа скипа в разгрузочные кривые, *м/сек*;

$\mu$  — коэффициент, характеризующий приведенную массу;

$j_{вх}$  — ускорение при движении в кривых в конце подъемного цикла, *м/сек<sup>2</sup>*;

$\gamma_{ст-к}$  — статическая нагрузка при движении в кривых в конце подъемного цикла в относительных единицах.

Коэффициент, характеризующий приведенную массу движущихся частей подъемной установки,

$$\mu = \frac{m D_6}{2 M_n i \eta_p}, \quad (4)$$

где  $m$  — масса движущихся частей подъемной установки, приведенная к радиусу органа навивки,  $\frac{\text{кг} \cdot \text{сек}^2}{\text{м}}$ ;

$D_6$  — диаметр барабана, *м*;

$M_n$  — номинальный момент двигателя, *кг/м*;

$i$  — передаточное число редуктора.

Третья ступень должна обеспечивать сход скипа с разгрузочных кривых с заданной скоростью без наложения механического тормоза. Ее соппротивление

$$R_3 = \frac{R_n (v_0 - 0,5 v_{сх})}{v_0 (\mu j_{сх} + \gamma_{ст-н})}, \quad (5)$$

где  $v_{сх}$  — принятая скорость схода, *м/сек*;

$j_{сх}$  — ускорение при движении скипа в кривых в начале подъемного цикла, *м/сек<sup>2</sup>*;

$\gamma_{ст-н}$  — статическая нагрузка при движении в кривых в начале подъемного цикла в относительных единицах.

Расчетные значения скорости схода рекомендуем принимать от 1,0 до 1,5 *м/сек* и скорости входа 0,6—1,0 *м/сек*. Ускорение при движении в кривых определяется по формулам

$$j_{вх} = \frac{v_{вх}^2}{2 h_p}, \quad (6)$$

$$j_{cx} = \frac{v_{cx}^2}{2 h_p}, \quad (7)$$

где  $h_p$  — путь сосуда в разгрузочных кривых,  $m$ .

На основании экспериментальных работ, проведенных на скиповом подъеме шахты № 8 треста „Прокопьевскуголь“ (Кузбасс), рекомендуем при движении скипа в разгрузочных кривых (из-за неуравновешенности мертвых весов подъемных сосудов и дополнительных сопротивлений) статическую нагрузку принимать на 15—50 % больше, чем при движении вне кривых. Таким образом, имеем

$$\gamma_{ст.к} = (1,15 \div 1,20) \frac{(\kappa Q - p H) D_0}{2 M_n i \eta_p}, \quad (8)$$

$$\gamma_{ст.н} = (1,15 \div 1,20) \frac{(\kappa Q + p H) D_0}{2 M_n i \eta_p}, \quad (9)$$

где  $p$  — вес погонного метра каната,  $кг/м$ ;

$H$  — полная высота подъема,  $м$ .

Расчет предварительных ступеней для клетового подъема также рекомендуется производить, исходя из конкретных условий их работы.

Все последующие основные ступени рассчитываются по закону геометрической прогрессии

$$R_{z+1} = R_z \varphi,$$

$$R_{z+2} = R_z \varphi^2,$$

.....

$$R_n = R_z \varphi^{n-z}, \quad (10)$$

где  $R_z$  — сопротивление последней предварительной ступени,  $ом$ ;

$\varphi$  — коэффициент сопротивлений, равный знаменателю геометрической прогрессии;

$R_n$  — сопротивление последней ступени реостата,  $ом$ ;

Коэффициент сопротивлений равен

$$\varphi = \sqrt[n-z+1]{\frac{R_{ром}}{R_z}}, \quad (11)$$

где  $R_{ром}$  — сопротивление одной фазы ротора двигателя,  $ом$ .

Для определения величины сопротивления отдельных секций пускового реостата следует определить разности сопротивлений смежных ступеней, например

$$\Delta R_{z+2} = R_{z+1} - R_{z+2}. \quad (12)$$

Секции предварительных ступеней следует комплектовать из ящиков с фехрелевыми элементами, сопротивление которых практически не зависит от температуры нагрева. Секции основных ступеней можно комплектовать ящиками с чугунными элементами. При таком подборе ящиков сопротивления влияние нагрева не должно сказываться на работу подъемной машины.

Для правильного выбора основного ускорения задаемся использованием перегрузочной способности двигателя

$$\lambda_1 = \frac{\tilde{\gamma}_1}{\tilde{\gamma}_M}, \quad (13)$$

где  $\tilde{\gamma}_1$  — максимальный пусковой момент двигателя в относительных единицах;

$\tilde{\gamma}_M$  — перегрузочная способность двигателя.

Относительное скольжение (отношение расчетного скольжения к критическому) для максимального пускового момента будет

$$\sigma_1 = \frac{1 \mp \sqrt{1 - \lambda_1^2}}{\lambda_1}. \quad (14)$$

Здесь и дальше знак минус для работы со скольжением меньше критического, а плюс для работы со скольжением больше критического.

Момент переключения в относительных единицах

$$\tilde{\gamma}_2 = \frac{2 \sigma_1 \varphi \tilde{\gamma}_M}{1 + \sigma_1^2 \varphi^2}. \quad (15)$$

Определив пределы пусковых моментов находим величину основного ускорения при разгоне вне кривых и сравниваем ее с допустимым ускорением

$$j_1 = \frac{0,5(\tilde{\gamma}_1 + \tilde{\gamma}_2) - \tilde{\gamma}_{cm \cdot n}}{\mu} \leq j_{доп}, \quad (16)$$

где  $\tilde{\gamma}_{cm \cdot n}$  — статический момент сопротивления при пуске в относительных единицах.

В этой формуле средний пусковой момент принят равным среднему арифметическому из пределов пускового момента. Статический момент сопротивления считается постоянным на все время пуска и определяется по формуле (9) без поправочного коэффициента.

Подъемные установки шахт Караганды и Кузбасса отличаются большой грузоподъемностью и сравнительно небольшой высотой подъема, поэтому при основном замедлении следует использовать режим свободного выбега

$$j_{св.в} = \frac{\tilde{\gamma}_{cm \cdot ост}}{\mu} \leq j_{доп}, \quad (17)$$

где  $\tilde{\gamma}_{cm \cdot ост}$  — статический момент сопротивления во время остановки (считается постоянным и определяется по формуле (8) без поправочного коэффициента).

Если величина замедления получается очень малой, то следует ориентироваться на тормозное замедление, при этом

$$j_m = \frac{\tilde{\gamma}_{cm \cdot ост} + \tilde{\gamma}_m}{\mu} \leq j_{доп}, \quad (18)$$

где  $\tilde{\gamma}_m$  — тормозной момент в относительных единицах. Приравняв между собой тормозное и допустимое замедление из формулы (18), можно определить необходимый тормозной момент.

Если же величина замедления при свободном выбеге получается большой, то ориентируемся на двигательное (реостатное) замедление, при этом

$$j_{дв} = \frac{\gamma_{см \cdot осм} - \gamma_{дв}}{\mu} \leq j_{доп}, \quad (19)$$

где  $\gamma_{дв}$  — средний момент двигателя в относительных единицах. Аналогично предыдущему определяется двигательный момент и при необходимости рассчитывается специальная реостатная характеристика.

После выбора основного ускорения и замедления по общеизвестным формулам рассчитываются элементы кинематики и динамики.

Если по каким-либо причинам выбрано ускорение, которое отличается от определяемого формулой (16), то надо определить пределы пусковых моментов. Эта задача может быть решена аналитически из системы двух уравнений

$$\begin{aligned} \gamma_1 + \gamma_2 &= 2(\gamma_{см \cdot n} + \mu j_1), \\ \gamma_2(\gamma_M - \sqrt{\gamma_M^2 - \gamma_1^2}) &= \varphi \gamma_1(\gamma_M - \sqrt{\gamma_M^2 - \gamma_2^2}). \end{aligned} \quad (20)$$

Однако решение этой системы уравнений сложно и поэтому пределы пусковых моментов проще найти графическим способом (рис. 1). Для этого строятся две любые основные реостатные характеристики и откладывается средний пусковой момент

$$\gamma_{н \cdot ср} = \gamma_{см \cdot n} + \mu j_1. \quad (21)$$

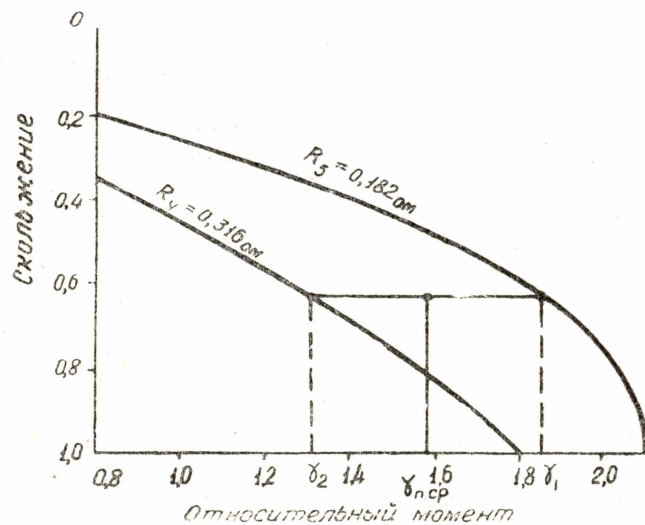


Рис. 1. Графическое определение пределов пускового момента.

После этого строится линия переключения, параллельная оси моментов, так, чтобы линия среднего пускового момента делила линию переключения на равные части. Точки пересечения линии переключения с реостатными характеристиками дадут искомые пусковые моменты. Для построения механической характеристики определяется критическое скольжение

$$s_K = \frac{s_{к.е} R}{R_{от}} = \frac{R(\gamma_M + \sqrt{\gamma_M^2 - 1})}{R_H}, \quad (22)$$

где  $s_{к.е}$  — критическое скольжение для естественной характеристики;  
 $R$  — сопротивление ступени, для которой определяется критическое скольжение, *о.м.*

Механические характеристики строятся по формуле

$$\gamma = \frac{2 \gamma_m s s_k}{s^2 + s_k^2} \quad (23)$$

После того, как определены движущие моменты для всех периодов подъемного цикла, определяем относительные токи

$$I^* = I_k \sqrt{1 \mp \sqrt{1 - (\gamma/\gamma_m)^2}}, \quad (24)$$

где  $I_k^* = \sqrt{\gamma_m (\gamma_m + \sqrt{\gamma_m^2 - 1})}$  — относительное значение тока при критическом скольжении.

Отметим, что для периода основного ускорения определяется отдельно ток для максимального пускового момента и момента переключения. В том случае, когда относительный момент меньше единицы, можно приравнять относительные значения тока и момента.

Предварительно выбранный двигатель проверяется по нагреву

$$I_{эф}^* = \sqrt{\frac{\sum I^{*2} t}{t_{эф}}} \leq 1, \quad (25)$$

где  $t_{эф}$  — эффективное время, *сек.*

Если эффективный ток больше единицы, то следует выбрать новый двигатель или меньшее ускорение при выбранном двигателе и все расчеты повторить снова.

Эффективное время рекомендуем определять из условий нормального охлаждения двигателя при его вращении, а ухудшение теплоотдачи во время паузы учитывать эмпирически подобранным коэффициентом

$$t_{эф} = \frac{H}{v_m} + q \Theta, \quad (26)$$

где  $q$  — коэффициент, учитывающий ухудшение теплоотдачи неподвижного двигателя, рекомендуется принимать для скиповых подъемов равным 2/3, для клетевых — 1/3.

При использовании жидкостного реостата все расчеты производятся гораздо проще, так как не требуется определять пределы пусковых моментов.

На каждой подъемной установке необходимо устанавливать счетчики активной энергии и счетчики числа подъемов. Это позволит правильно оценивать работу машинистов и определять к. п. д. подъемной установки. Кроме того, надо добиваться, чтобы машинист научился производить подъемный цикл, соответствующий запроектированной диаграмме скорости. Для этого необходимо время от времени контролировать работу машинистов путем записи диаграмм скорости и тока самопишущими приборами.

Для иллюстрации предлагаемой методики проектирования рассмотрим скиповой подъем шахты № 86 треста „Сталинуголь“ (Караганда). Подъемная машина  $2 \times 5 \times 2,3$ ; двигатель типа АТ 18 В 10 — 20,

720 квт, 295 об/мин; редуктор одноступенчатый с передаточным числом 10,5. Полная высота подъема 510 м; скип с секторным затвором емкостью 6 т; вес погонного метра каната 6,2 кг/м; приведенная масса  $7.200 \frac{\text{кг/сек}^2}{\text{м}}$ ; магнитная станция восьмиконтактная.

Результаты расчетов сведены в табл. 1. Графическое определение пределов пусковых моментов приведено на рис. 1. Эффективный ток составляет 0,92, к. п. д. подъемной установки 0,60.

Таблица 1

Результаты расчета элементов кинематики и динамики

Периоды подъемного цикла	Ускорение, $\text{м/сек}^2$	Скорость $\text{м/сек}$	Время, $\text{сек}$	Относительный момент		Относительный ток	
				верхний предел	нижний предел	верхний предел	нижний предел
Сход скипа с кривых	0,3	0—1,2	4,0	1,18	1,18	1,20	1,20
Разгон вне кривых	0,8	1,2—7,35	7,6	1,85	1,31	2,10	1,35
Равномерный ход	—	7,35	58,5	0,97	0,43	0,97	0,43
Основное замедление	-0,6	7,35—1,0	10,2	—	—	—	—
Дотягивание	0,25	1,0—0	4,0	0,34	0,34	0,34	0,34

В действительности подъем работает с меньшими ускорениями; что видно из диаграммы скорости (рис. 2). К. п. д. подъемной уста-

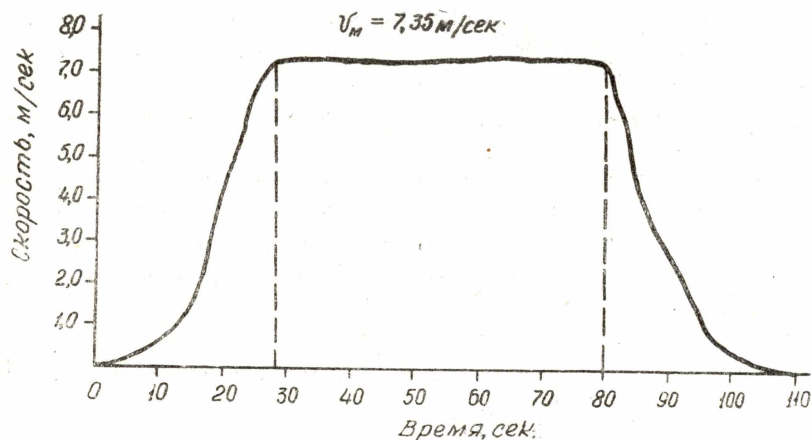


Рис. 2. Диаграмма скорости скипового подъема шахты № 86.

новки составляет 0,47, а производительность ниже возможной на 25%. Такое снижение к. п. д. приводит к излишнему расходу энергии примерно 0,5 млн. квт·ч в год.