

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА ПРИ КОНТАКТОРНОМ ПУСКЕ ПОДЪЕМНОЙ МАШИНЫ

В. Д. ПЕТУНОВ

(Представлено научно-технической конференцией горного факультета)

Если принять за базисные единицы опрокидывающий момент асинхронного двигателя M_k , критическое скольжение s_k и пренебречь активным сопротивлением статорной обмотки, то получим универсальное уравнение механической характеристики [1]

$$\lambda = \frac{2\sigma}{1 + \sigma^2}, \quad (1)$$

где $\lambda = \frac{M}{M_k}$ — относительный момент;
 $\sigma = \frac{s}{s_k}$ — относительное скольжение.

Уравнение (1) пригодно для всех двигателей с фазным ротором при любой величине активного сопротивления в роторной цепи.

Для упрощения расчетов и графических построений рекомендуется [2, 3] взамен криволинейной механической характеристики, выраженной уравнением (1), применять спрямленные механические характеристики, определяемые синхронной и номинальной скоростью вращения. Уравнение спрямленной характеристики

$$\lambda = k_1 \sigma, \quad (2)$$

где k_1 — угловой коэффициент, характеризующий жесткость механической характеристики.

Для номинального момента двигателя

$$\frac{1}{\gamma_M} = k_1 \sigma_n, \quad (3)$$

где γ_M — перегрузочная способность двигателя,
 σ_n — относительное номинальное скольжение.

Угловой коэффициент

$$k_1 = \frac{2}{1 + \sigma_n^2} = \frac{\gamma_M + \sqrt{\gamma_M^2 - 1}}{\gamma_M}. \quad (4)$$

Из (4) видно, что угловой коэффициент зависит только от перегрузочной способности двигателя. Для двигателей, используемых в шахтном подъеме, $\gamma_M = 1,8 \div 2,8$ и $\kappa_1 = 1,83 \div 1,94$. Сравнительные расчеты (табл. 1) показывают, что криволинейную характеристику можно заменить спрямленной только в интервале относительных скольжений $\sigma = 0 \div 0,3$.

Доктор технических наук Л. Б. Гейлер [4] и инж. Г. М. Каялов [5] для приближенной замены уравнения криволинейной характеристики предложили уравнение параболы

$$\lambda = 2\sigma - \sigma^2. \quad (5)$$

Относительная ошибка при использовании этого уравнения

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\sigma^3 - 2\sigma^2 + \sigma}{2}. \quad (6)$$

Максимальная ошибка получается при $\sigma = 1/3$ и составляет 7,41 % опрокидывающего момента двигателя. Эта ошибка, пересчитанная к номинальному моменту, будет составлять от 13,3 до 20,7 % соответственно для двигателей с перегрузочной способностью 1,8 и 2,8. Сравнительные расчеты (табл. 2) показывают, что уравнение параболы (5) можно использовать при $\sigma \geq 0,7$, т. е. в области скольжений, близких к критическим.

Уравнение криволинейной механической характеристики (1) можно выразить в следующем виде

$$\lambda = 2\sigma - \lambda\sigma^2 \quad (7)$$

и для более точной замены использовать уравнение параболы

$$\lambda = 2\sigma - \beta\sigma^2, \quad (8)$$

где β — поправочный коэффициент, определяемый условиями пуска.

Очевидно, что уравнение (5) есть частный случай уравнения (8), в котором $\beta = 1$. При контакторном пуске можно принять

$$\beta = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2}, \quad (9)$$

где λ_1 и λ_2 — соответственно максимальный пусковой момент и момент переключения.

Из уравнений (7) и (8) видно, что наименьшая погрешность достигается при равенстве поправочного коэффициента и момента двигателя в относительных единицах. Расчеты показывают (табл. 2), что уравнением параболы (8) с соответствующим поправочным коэффициентом можно заменить уравнение криволинейной характеристики.

Хорошие результаты дает замена уравнения (1) уравнением параболы, не проходящей через точку синхронной скорости

$$\lambda = 2\sigma - \beta\sigma^2 + \beta - 1, \quad (10)$$

где $\beta = 1,04 \div 1,06$.

Таблица 1

Сравнение криволинейной и прямой механических характеристик

σ	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
Уравнение										
$\lambda = \frac{2\sigma}{1 + \sigma^2}$	0,198	0,385	0,551	0,689	0,800	0,882	0,940	0,975	0,994	1,0
$\lambda_1 = 1,83\sigma$	0,183	0,366	0,550	0,732	0,915	1,10	1,28	1,46	1,65	1,83
$\frac{\lambda_1}{\lambda} \cdot 100\%$	92,3	93,0	100	106	114	125	136	150	166	183
$\lambda_2 = 1,94\sigma$	0,194	0,388	0,582	0,776	0,970	1,16	1,36	1,55	1,75	1,94
$\frac{\lambda_2}{\lambda} \cdot 100\%$	98,0	101	106	113	121	132	145	159	176	194

Таблица 2

Сравнение криволинейной механической характеристики и параболической вида $\lambda = 2x \beta x$

σ	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
Уравнение										
$\lambda = \frac{2\sigma}{1 + \sigma^2}$	0,198	0,385	0,551	0,689	0,800	0,882	0,940	0,975	0,994	1,0
$\lambda_1 = 2\sigma - 0,4\sigma^2$	0,196	0,384	0,564	0,736	0,900	1,055	1,204	1,344	1,476	1,60
$\lambda_1/\lambda \cdot 100\%$	99	100	102	107	113	120	128	138	148	160
$\lambda_2 = 2\sigma - 0,5\sigma^2$	0,195	0,380	0,555	0,720	0,875	1,020	1,155	1,280	1,395	1,50
$\lambda_2/\lambda \cdot 100\%$	98,5	99	101	105	110	116	123	131	140	150
$\lambda_3 = 2\sigma - 0,6\sigma^2$	0,194	0,376	0,546	0,704	0,850	0,984	1,106	1,216	1,314	1,40
$\lambda_3/\lambda \cdot 100\%$	98	97,6	99	102	106	112	118	125	132	140
$\lambda_4 = 2\sigma - 0,7\sigma^2$	0,193	0,372	0,537	0,688	0,825	0,948	1,057	1,152	1,233	1,30
$\lambda_4/\lambda \cdot 100\%$	97,5	96,7	97,5	100	103	108	112	118	124	130
$\lambda_5 = 2\sigma - 0,8\sigma^2$	0,192	0,368	0,528	0,672	0,800	0,912	1,008	1,088	1,152	1,20
$\lambda_5/\lambda \cdot 100\%$	97	95,6	95,7	97,5	100	103	107	112	116	120
$\lambda_6 = 2\sigma - 0,9\sigma^2$	0,191	0,364	0,519	0,656	0,775	0,876	0,959	1,024	1,071	1,10
$\lambda_6/\lambda \cdot 100\%$	96,5	94,5	94,5	95,5	97	99,2	102	105	108	110
$\lambda_7 = 2\sigma - \sigma^2$	0,190	0,360	0,510	0,640	0,750	0,840	0,910	0,960	0,990	1,0
$\lambda_7/\lambda \cdot 100\%$	96	93,5	92,6	93	93,8	95,4	96,8	98,5	99,6	100

Сравнение криволинейной механической характеристики и параболы вида $\lambda = 2\sigma - \beta\sigma^2 + \gamma\sigma^3 - 1$

σ	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
Уравнение										
$\lambda = \frac{2\sigma}{1 + \sigma^2}$	0,198	0,385	0,551	0,689	0,800	0,882	0,940	0,975	0,994	1,0
$\lambda_1 = 2\sigma - 1,04\sigma^2 + 0,04$	0,230	0,398	0,546	0,674	0,780	0,866	0,931	0,975	0,998	1,0
$\frac{\lambda_1}{\lambda} \cdot 100\%$	116	103	99	98	97,5	98,2	99,3	100	100	100
$\lambda_2 = 2\sigma - 1,05\sigma^2 + 0,05$	0,240	0,408	0,555	0,682	0,788	0,872	0,936	0,978	1,0	1,0
$\frac{\lambda_2}{\lambda} \cdot 100\%$	121	106	101	99	98,4	98,8	99,6	100	100,5	100
$\lambda_3 = 2\sigma - 1,06\sigma^2 + 0,06$	0,249	0,418	0,565	0,690	0,795	0,878	0,941	0,982	1,0	1,0
$\frac{\lambda_3}{\lambda} \cdot 100\%$	126	108	102	100	99,5	99,5	100	101	100,5	100

Таблица 4

Сравнение криволинейной и механической характеристики и параболической вида $\lambda = 2\sigma - 1,1\sigma^2$

σ	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
Уравнение										
$\lambda = \frac{2\sigma}{1 + \sigma^2}$	0,198	0,385	0,551	0,689	0,800	0,882	0,940	0,975	0,994	1,0
$\lambda_1 = 0,45^2 \lambda$	0,179	0,348	0,498	0,622	0,722	0,796	0,848	0,880	0,898	0,903
$\lambda_1/\lambda \cdot 100 \%$	90,3	90,3	90,3	90,3	90,3	90,3	90,3	90,3	90,3	90,3
$\lambda_2 = 2\sigma - 1,1\sigma^2$	0,189	0,356	0,501	0,624	0,725	0,804	0,861	0,896	0,909	0,90
$\lambda_2/\lambda_1 \cdot 100 \%$	105	102	100	100	100	101	102	102	102	99,7

Проведенные расчеты (табл.3) показывают, что уравнение параболы (10) при относительных скольжениях $\sigma > 0,2$ довольно точно заменяет уравнение (1).

В действительных условиях эксплуатации подъемных машин часто имеет место понижение напряжения при пуске на 5 % от номинального. При таком снижении напряжения с достаточной точностью, что подтверждается расчетами, приведенными в табл. 4, можно воспользоваться уравнением параболы

$$\lambda = 2\sigma - 1,1\sigma^2. \quad (11)$$

Графическое построение всех указанных характеристик приведено на рис. 1.

Напишем уравнение движения при пуске подъемной машины с постоянным радиусом навивки в следующем виде:

$$\lambda - \lambda_{cm} = -T \frac{d\sigma}{dt}, \quad (12)$$

где λ_{cm} — относительный момент статического сопротивления, который считается постоянным на все время пуска, так как нагрузка от разности веса канатов за время пуска практически составляет менее 3 % веса полезного груза;

T — механическая постоянная времени, сек.

Механическая постоянная времени

$$T = \frac{\mu v_0 s_k}{\gamma_m}, \quad (13)$$

где μ — отношение приведенной массы к номинальному усилию двигателя на валу барабана;

v_0 — скорость подъема, соответствующая синхронной скорости двигателя, м/сек.

Время переходного процесса

$$t = T \int_{\sigma_1}^{\sigma_2} \frac{d\sigma}{\lambda - \lambda_{cm}}, \quad (14)$$

где σ_1 и σ_2 — соответственно начальное и конечное скольжение в относительных единицах.

Совместное решение (1) и (14) дает

$$t = T \int_{\sigma_1}^{\sigma_2} \frac{(\sigma^2 + 1) d\sigma}{\lambda_{cm} \sigma^2 - 2\sigma + \gamma_{cm}}. \quad (15)$$

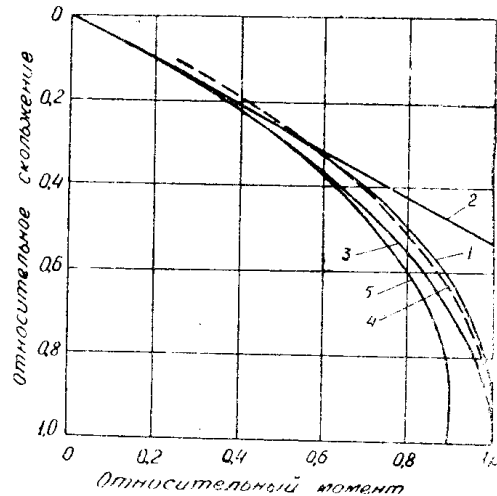


Рис. 1. Универсальные механические характеристики асинхронного двигателя.

Кривые построены:

1 — по уравнению $\lambda = \frac{2\sigma}{1 + \sigma^2}$;

2 — по уравнению $\lambda = K_1\sigma$, при $K_1 = 1,90$; 3 — по уравнению $\lambda = 2\sigma - \sigma^2$;

4 — по уравнению $\lambda = 2\sigma - \beta\sigma^2 + \beta - 1$, при $\beta = 1,16$; 5 — по уравнению $\lambda = 2\sigma - 1,1\sigma^2$.

Уравнение (15) разбивается на два табличных интеграла. После подстановки пределов интегрирования и преобразований имеем

$$t = T\alpha^2 \left[\text{Cln} \frac{(A - \sigma^2)(\sigma_1 - B)}{(A - \sigma_2)(\sigma_2 - B)} - \ln \frac{2\alpha\sigma_1 - \sigma_1^2 - 1}{2\alpha\sigma_2 - \sigma_2^2 - 1} - \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\alpha} \right], \quad (16)$$

где $\alpha = \frac{1}{\gamma_{cm}}$;

$$B = \alpha - \sqrt{\alpha^2 - 1};$$

$$A = \alpha + \sqrt{\alpha^2 - 1};$$

$$C = \frac{\alpha}{\sqrt{\alpha^2 - 1}}.$$

Полученное выражение считается наиболее точным для определения времени разгона и примерно в таком же виде приводится в литературе [6]. Когда конечное скольжение незначительно отличается от установившегося, например разница между ними составляет 15—20%, имеем $B \approx \sigma_2$. При этом первый член уравнения (16) дает существенную ошибку, из-за которой общий результат может получиться с погрешностью до 30—50%. Поэтому следует избегать формул, в которые входит разность близких величин [7] и использовать взамен (16) следующее уравнение:

$$t = T\alpha^2 \left[\text{Cln} \frac{A\sigma_1 + B\sigma_2 - \sigma_1\sigma_2 - 1}{A\sigma_2 + B\sigma_1 - \sigma_1\sigma_2 - 1} - \ln \frac{2\alpha\sigma_1 - \sigma_1^2 - 1}{2\alpha\sigma_2 - \sigma_2^2 - 1} - \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\alpha} \right]. \quad (17)$$

Однако уравнения (16) и (17) являются сложными для практического применения. Более просто поставленная задача решается при использовании уравнений (2), (5), (8) и (10).

Совместное решение (2) и (14) дает

$$t = \frac{T}{\kappa_1} \ln \frac{\kappa_1 \sigma_1 - \gamma_{cm}}{\kappa_1 \sigma_2 - \gamma_{cm}}. \quad (18)$$

Полученная формула (18) является наиболее простой, но пользоваться ею можно только при относительных скольжениях до 0,30.

Решение уравнений (5) и (14) дает

$$t = \frac{T}{2\alpha} \ln \frac{(A - \sigma_2)(\sigma_1 - B)}{(A - \sigma_1)(\sigma_2 - B)}, \quad (19)$$

где $a = \sqrt{1 - \gamma_{cm}}$; $A = 1 + a$; $B = 1 - a$.

Раскрывая скобки в уравнении (19), получим

$$t = \frac{T}{2a} \ln \frac{A\sigma_1 + B\sigma_2 - \sigma_1\sigma_2 - \lambda_{cm}}{A\sigma_2 + B\sigma_1 - \sigma_1\sigma_2 - \lambda_{cm}}. \quad (20)$$

Полученные уравнения (19—20) значительно проще (16—17). Ими рекомендуют пользоваться доктор технических наук Л. Б. Гейлер [4] и канд. техн. наук Л. Г. Живов [6]. Однако Л. Б. Гейлер рассматривает случай внезапного увеличения нагрузки на валу двигателя и его работу вблизи от точки опрокидывания, при этом замена криволинейной характеристики параболической почти не имеет расхождений по моменту и по скольжению, а следовательно, и по времени переходного процесса. Следует только помнить, что для этих формул критическое скольжение определяется из уравнения параболической характеристики

$$s_k = s_H \gamma_M \left(1 + \sqrt{1 - \frac{1}{\gamma_M}} \right), \quad (21)$$

где s_H — номинальное скольжение.

Совместное решение уравнений (8) и (14) дает время переходного процесса

$$t = \frac{T}{2a} \ln \frac{(A - \beta\sigma_2)(\beta\sigma_1 - B)}{(A - \beta\sigma_1)(\beta\sigma_2 - B)} \quad (22)$$

или

$$t = \frac{T}{2a} \ln \frac{A\sigma_1 + B\sigma_2 - \beta\sigma_1\sigma_2 - \lambda_{cm}}{A\sigma_2 + B\sigma_1 - \beta\sigma_1\sigma_2 - \lambda_{cm}}, \quad (23)$$

где

$$a = \sqrt{1 - \beta\lambda_{cm}}; \quad A = 1 + a; \quad B = 1 - a.$$

Пределы моментов для определения поправочного коэффициента находятся из уравнения криволинейной механической характеристики путем постановки соответствующих скольжений.

Совместное решение уравнений (10) и (14) даст время переходного процесса

$$t = \frac{T}{2a} \ln \frac{(A - \beta\sigma_2)(\beta\sigma_1 - B)}{(A - \beta\sigma_1)(\beta\sigma_2 - B)} \quad (24)$$

или

$$t = \frac{T}{2a} \ln \frac{A\sigma_1 + B\sigma_2 - \beta\sigma_1\sigma_2 + \beta - 1 - \lambda_{cm}}{A\sigma_2 + B\sigma_1 - \beta\sigma_1\sigma_2 + \beta - 1 - \lambda_{cm}}, \quad (25)$$

где

$$a = \sqrt{1 - \beta(1 + \lambda_{cm} - \beta)}; \quad A = 1 + a; \quad B = 1 - a.$$

Если $\beta = 1,04 \dots 1,06$, то можно принять

$$a = 1,03 \sqrt{1 - \lambda_{cm}}. \quad (26)$$

Часто бывает необходимым определить время разгона на естественной характеристике двигателя от момента переключения до момента статического сопротивления. Этот участок механической харак-

теристики может быть заменен отрезком прямой. Примем ускорение, соответствующее начальному моменту статического сопротивления, составляющим 1 % от ускорения при переключении [6]. Тогда искомое время

$$t \approx 2,5 T. \quad (27)$$

Полное время отпуска складывается из времени разгона на отдельных ступенях с учетом времени предварительных ступеней и времени, необходимого для достижения установившейся скорости на естественной характеристике.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бычков В. П. Графические методы построения кривых асинхронного двигателя. Электричество, № 9, 1945.
2. Балашев И. А. Расчет металлических реостатов и настройка контакторных панелей рудничных подъемных установок. Известия ТПИ, т. 67, 1949.
3. Шклярский Ф. П. Физико-механические основы электрического рудничного подъема. Углетехизд т, 1953.
4. Гейлер Л. Б. О переходном режиме асинхронного двигателя при внезапном изменении нагрузки на валу. Электричество, № 8, 1937.
5. Каялов Г. М. Работа асинхронного двигателя при вращающем моменте, близком к опрокидывающему. Бюллетень электропромышленности, № 7, 1937.
6. Живов Л. Г. Привод и автоматика шахтных подъемных машин. Машгиз, 1952.
7. Безикович Я. С. Приближенные вычисления. ГИТТ, 1941.