

УДК 621.86/87

Расчет мощности электродвигателя механизмов с большими инерционными массами и малыми моментами статического сопротивления

Богачев В. Н.¹, Пучкова Л. М.^{1,*}

[*puchkova-pk-3-2014@mail.ru](mailto:puchkova-pk-3-2014@mail.ru)

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Для определения мощности электродвигателя, требуемой для разгона машины с заданным ускорением, необходимо знать относительное время пуска. Известные формулы получены численным интегрированием пусковых характеристик двигателей при условии, что процесс разгона заканчивается, когда двигатель разгоняется до номинальной частоты вращения. В реальных условиях процесс разгона заканчивается, когда частота вращения ротора соответствует статическому моменту от сил трения. В работе получены уточненные формулы для определения относительного времени пуска, которые позволяют более точно определить мощность электродвигателя. Показано, что трехступенчатый реостатный пуск двигателей с фазным ротором предпочтительнее двухступенчатого пуска.

Ключевые слова: грузоподъемная машина, электродвигатель, мощность, момент, частота вращения, пусковая характеристика, ускорение, время

Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором [1] широко применяются в приводах механизмов передвижения, поворота технологических кранов, электроталей и кран-балок там, где не требуется регулирование скорости или достаточно ступенчатого регулирования при пуске. При расчете мощности электродвигателя механизмов, обладающих большими инерционными массами и малыми моментами статического сопротивления (например, механизмы поворота кранов с гибким подвесом груза) ограничивают ускорение при пуске для снижения динамических нагрузок и предотвращения чрезмерного раскачивания груза [2]. Для предохранения от перегрузок при пуске используют предохранительные устройства. Существующие методы расчета основаны на условии, что процесс пуска заканчивается тогда, когда момент на двигателе соответствует номинальному значению. Однако, мощность, требуемая при пуске, может в несколько раз превышать мощность для преодоления сил статического сопротивления и тогда процесс пуска заканчивается при моменте на двигателе в несколько раз меньше номинального. Инерционные

нагрузки зависят от ускорения, определяемого через время пуска. Увеличивая время пуска, можно понизить требуемую мощность электродвигателя и значительно уменьшить динамические нагрузки при пуске.

Целью работы является уточнение расчета мощности электродвигателя с учетом пусковых характеристик и момента, требуемого для преодоления сил трения.

В работе использованы пусковые характеристики асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым [1] и фазным [3],[4] ротором, которые были построены в относительных координатах. Обработка пусковых характеристик выполнялась методом численного интегрирования.

Механическая мощность для преодоления инерционных нагрузок и сил статического сопротивления определяется по формуле:

$$P = \frac{T \cdot n_n}{9550} \quad (1),$$

где: T, n_n - соответственно момент и номинальная частота вращения вала электродвигателя,

$$T = \frac{\pi \cdot J_{пр.п} \cdot n_n \cdot t_{по}}{30 \cdot t_{п}} \quad (2),$$

где $J_{пр.п}$ - момент инерции вращающихся и поступательно движущихся масс, приведенный к валу двигателя, $t_{по}$ - относительное время пуска, t_n - время пуска.

$$t_{п} = \frac{v}{[a]},$$

v - окружная скорость, $[a]$ - допускаемое ускорение.

Время пуска ограничено допускаемым ускорением [5].

Используя универсальную формулу, выведенную в общем виде, не зависимо от типа двигателя из уравнения неустановившегося движения при пуске:

$$dt_{п} = \frac{\pi}{30} \cdot \frac{J_{пр.п}}{T_n} \cdot \frac{dn_k}{m_k - \alpha},$$

условно приняв, что процесс разгона заканчивается, когда ротор двигателя разгоняется до номинальной частоты вращения, $n_k = n_n$, определено время пуска:

$$t_{п} = \int_0^{n_n} dt_{п} = \frac{\pi}{30} \cdot \frac{J_{пр.п}}{T_n} \int_0^{n_n} \frac{dn_k}{m_k - \alpha} = \frac{\pi}{30} \cdot \frac{J_{пр.п}}{T_n} \cdot n_n \cdot t_{по},$$

где

$$\int_0^{n_n} \frac{dn_k}{m_k - \alpha} = n_n \cdot t_{по}. \quad (3)$$

В формулах приняты обозначения:

n_k - текущая частота вращения вала электродвигателя при пуске, T_n - номинальный момент электродвигателя, рассчитанный при номинальной мощности и номинальной частоте вращения, $m_k = \frac{T_k}{T_n}$ - текущая перегрузочная способность электродвигателя при пуске, T_k - текущий момент на валу электродвигателя при пуске, $a = \frac{T_{ст}}{T_n}$ - кратность загрузки двигателя при установившемся движении, $T_{ст}$ - момент необходимый для преодоления

сил трения (статического сопротивления) при установившемся процессе, приведенный к валу электродвигателя.

В работе [6] относительное время пуска $t_{\text{по}}$ определено численным интегрированием выражения $\int_0^{n_n} \frac{dn_k}{m_k - \alpha}$ по пусковым характеристикам электродвигателей для границ интегрирования от $n_k=0$, до $n_k = n_n$ и получены выражения:

- для двигателей с короткозамкнутым ротором (серии АИРС и МТК)

$$t_{\text{по}} \cong \frac{1}{0,75 \cdot (m - \alpha)} \quad (4),$$

- для двигателей с фазным ротором (серии МТ)

$$t_{\text{по}} \cong \alpha + \frac{2,5}{m \cdot \sqrt{m}} \quad (5).$$

В формулах (4) и (5), используемых в настоящее время, $m = \frac{T_{\text{max}}}{T_n}$, T_{max} – максимальный момент, развиваемый двигателем при пуске,

В действительности процесс разгона заканчивается, когда двигатель разгоняется до частоты вращения $n_{\text{ст}}$, соответствующей статическому моменту $T_{\text{ст}}$. Существует большое количество механизмов, например, механизмы поворота кранов, у которых момент статического сопротивления $T_{\text{ст}}$ существенно меньше момента, определенного с учетом инерционных нагрузок T (2), определенного по условию разгона с заданным ускорением [5]. Поэтому в настоящей работе в формуле (3) границы интегрирования установлены от $n_k=0$, до $n_k = n_{\text{ст}}$ и вычислен интеграл

$$\int_0^{n_{\text{ст}}} \frac{dn_k}{m_k - \alpha} \quad (6).$$

Определение относительного времени пуска для двигателей с короткозамкнутым ротором

Механические пусковые характеристики двигателей с коротко замкнутым ротором обычного исполнения (серии АИР, рис. 1а) и двигателей повышенного скольжения (АИРС, рис. 1б) существенно отличаются.

В расчетах использованы пусковые характеристики электродвигателей [3], построенные в относительных координатах $\frac{T_k}{T_n}, \frac{n_k}{n_n}$ (рис. 1).

С учетом того, что отношение $\frac{T_{\text{ст}}}{T_n}$ изменяется при изменении загрузки двигателя, выполнено численное интегрирование выражения (6) и получена формула:

$$t_{\text{по}} = \frac{1}{\rho \cdot (m - \alpha)}, \quad (7)$$

ρ – коэффициент, полученный численным интегрированием, изменяющийся в зависимости от отношения $\frac{T_{ст}}{T_n}$.

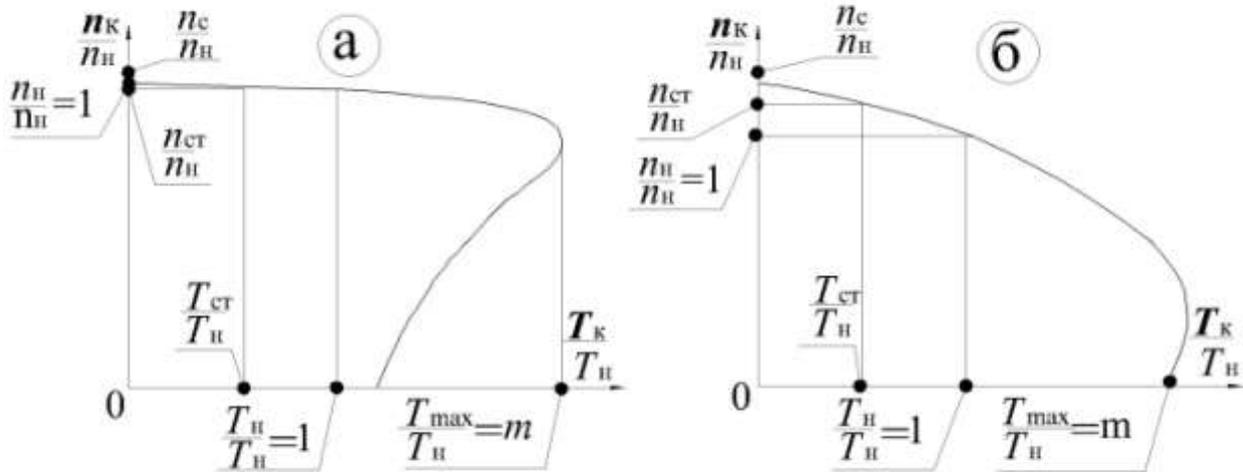


Рис.1. Механические пусковые характеристики асинхронных электродвигателей: а – серии АИР, б – серии АИРС, построенные в относительных координатах $\frac{T_k}{T_n}, \frac{n_k}{n_n}$

Введение коэффициента ρ обусловлено тем, что при изменении момента от T_n до 0 механическая характеристика близка к линейной функции. Вычисленные значения коэффициента ρ для двигателей серии АИР и АИРС приведены в табл. 1 и на рис.2.

Графики на рис.2 близки к линейным функциям, поэтому промежуточные значения можно определить методом линейной интерполяции.

При малых значениях кратности загрузки электродвигателя ($a = \frac{T_{ст}}{T_n}$) величина коэффициента ρ отличается от постоянного числа 0,75 в известной формуле (4) более, чем в два раза. Следовательно, во столько же раз уменьшится мощность электродвигателя, определенная по формулам (1,2).

Таблица 1. Расчетные значения коэффициента ρ в зависимости от относительного статического момента $\frac{T_{ст}}{T_n}$ (кратность загрузки двигателя - a) для асинхронных двигателей серий АИР и АИРС

$\frac{T_{ст}}{T_n}$	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0,05	0,02	0,01
ρ АИР	0,67	0,77	0,87	0,97	1,07	1,17	1,27	1,37	1,47	1,57	1,62	1,65	1,67
АИРС	0,68	0,77	0,86	0,94	1,02	1,1	1,2	1,3	1,38	1,47	1,57	1,55	1,56

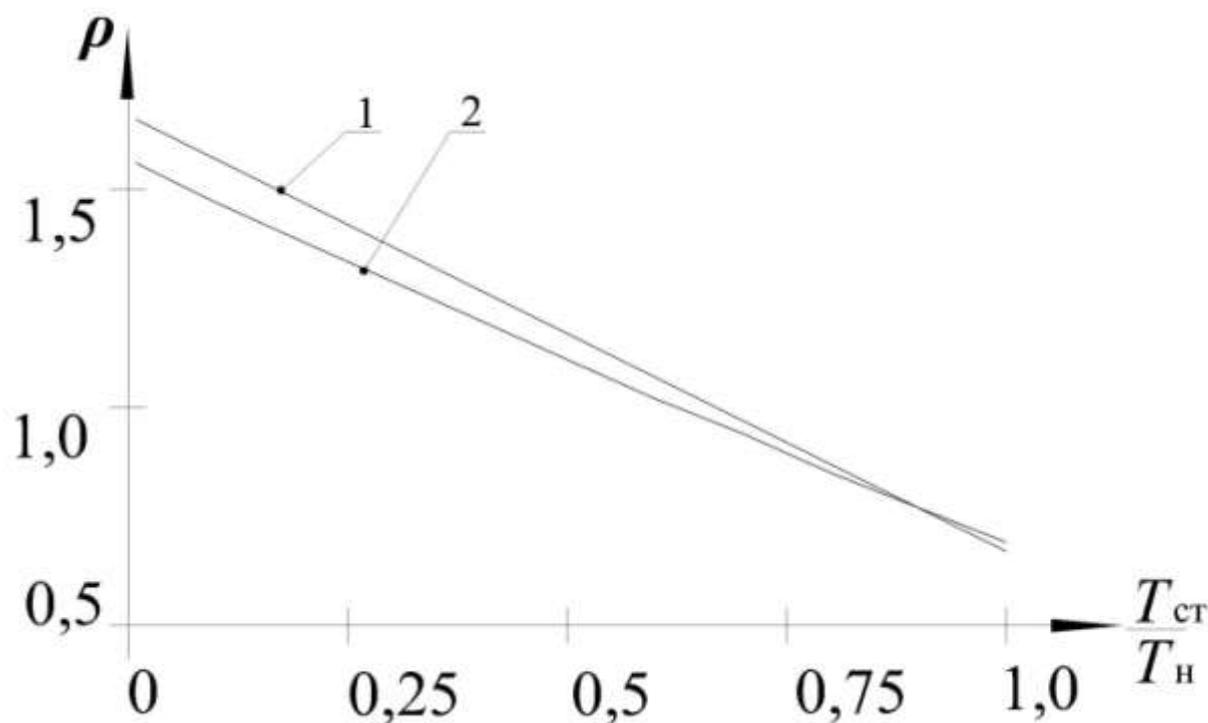


Рис.2. Расчетные значения коэффициента ρ в зависимости от $a = \frac{T_{ст}}{T_n}$ для двигателей: 1 – серии АИР, 2 – серии АИРС

Разработка уточненных рекомендаций по выбору крановых фазных электродвигателей типа МТ

Для особо тяжелых условий пуска (в ГПМ большие инерционные нагрузки) в электроприводах малой и средней мощности применяются асинхронные двигатели с фазным ротором. В этих двигателях задача снижения пусковых токов и повышения пускового момента решается путем ввода в цепь ротора пускового реостата.

В отличие от асинхронных двигателей пусковая характеристика получается ступенчатой, так как состоит из нескольких искусственных характеристик, последовательно отключаемых после вывода на естественную механическую характеристику. Естественная механическая характеристика соответствует характеристике двигателя серии АИР. На практике применяют двух [4] или трехступенчатое [3] регулирование запуска электродвигателя. Трехступенчатое регулирование применяют чаще, так как при этом возможно получить больший пусковой момент ($T_{пуск}$).

Численное интегрирование выполнено для пусковых характеристик, приведенных на рис.3.

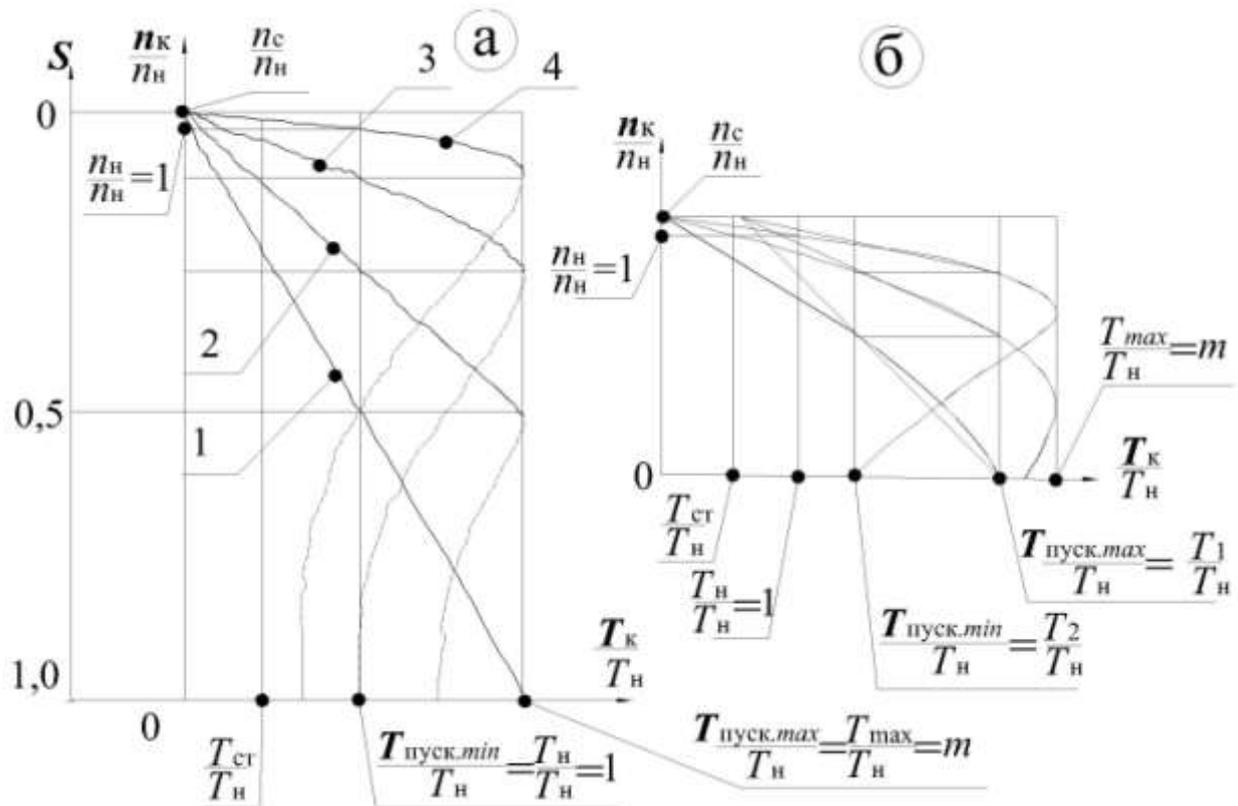


Рис.3. Механические пусковые характеристики асинхронных электродвигателей с фазным ротором, построенные в относительных координатах: $\frac{T_k}{T_n}, \frac{n_k}{n_n}$: а – трехступенчатый реостатный пуск, б – двухступенчатый реостатный пуск

Пусковая характеристика для трехступенчатого пуска (рис.3а) построена в координатах: относительный момент $\frac{T_k}{T_n}$ в зависимости от относительного скольжения S ($S = \frac{n_c - n_n}{n_c}$, где n_c -синхронная частота вращения) или от относительной частоты вращения $\frac{n_k}{n_n}$.

Время разгона электродвигателя зависит от выбора величины минимального ($T_{пуск.мин}$) и максимального ($T_{пуск.макс}$) пусковых моментов. С целью повышения пускового момента рассчитывают сопротивления резисторов из условий: $T_{пуск.мин} = T_n$, $T_{пуск.макс} = T_{max}$ (T_{max} - максимальный момент, $T_{max} = m * T_n$).

Так как исходным материалом являются пусковые характеристики, выполненные в произвольном масштабе, то при обработке материала измеряли линейные размеры, которые затем пересчитывали в относительные величины.

При обработке пусковых характеристик на рис.3 определяли площадь (F_k) фигуры, ограниченной кусочно-линейной функцией пусковой характеристики, линией, параллельной оси ординат $\frac{n_k}{n_n}$ и проходящей через значение $\frac{T_{ст}}{T_n}$, и осью $\frac{T_k}{T_n}$. Площадь F_k относили к площади F_n , ограниченной осями координат и линиями параллельными осям координат и

проходящими через значения $\frac{n_k}{n_H} = \frac{n_H}{n_H}$ и $\frac{T_k}{T_H} = \frac{T_H}{T_H}$. Относительное время пуска: $t_{по} = \frac{1}{F_k/F_H}$.

Результаты расчета при соотношении $m = \frac{T_{max}}{T_H} = \frac{T_{пуск,max}}{T_{пуск,min}} = 2,077$ приведены в табл. 2.

Таблица 2. Расчетные значения относительной площади $\frac{F_k}{F_H}$ и относительного времени пуска $t_{по}$ в зависимости от относительного статического момента $\frac{T_{ст}}{T_H}$ (кратность загрузки двигателя-а) для фазного электродвигателя типа МТ при соотношении $\frac{T_{пуск,max}}{T_{пуск,min}}=2,077*$

$\frac{T_{cm}}{T_H}$	0,01	0,02	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$\frac{F_k}{F_H}$	1,54	1,52	1,49	1,43	1,34	1,24	1,14	1,05	0,95	1,05	0,75	0,66	0,55
$t_{по}$	0,65	0,66	0,67	0,7	0,75	0,8	0,87	0,95	1,05	1,17	1,32	1,52	1,8

*численное интегрирование по площадям

Пусковые характеристики при реостатном пуске близки к линейным, поэтому методом линейной интерполяции получена формула для расчета относительного времени пуска в зависимости от кратности загрузки двигателя $a = \frac{T_{ст}}{T_H}$.

Если сопротивления подобраны из условия $T_{пуск,min}=T_H$, $T_{пуск,max}=T_{max}$, то значения $t_{по}$ можно рассчитать по формуле:

$$t_{по} = \frac{1}{(m-1)*0,5+(1-a)} \quad (8).$$

Значения $t_{по}$, вычисленные по формуле (8) в зависимости от $\frac{T_{ст}}{T_H}$, приведены в табл.

3.

Таблица 3. Относительное время пуска $t_{по}$, рассчитанное по формуле (8) в зависимости от относительного статического момента $\frac{T_{ст}}{T_H}$ для фазного электродвигателя типа МТ при соотношении $\frac{T_{пуск,max}}{T_{пуск,min}}=2,077$

$\frac{T_{cm}}{T_H}$	0,01	0,02	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$t_{по}$	0,65	0,66	0,67	0,7	0,75	0,81	0,88	0,96	1,06	1,2	1,35	1,57	1,86

Значения относительного времени пуска в табл. 2 и 3 не совпадают, так как при выводе формулы (8) не учтено изменение скольжения в зависимости от соотношения $\frac{T_{ст}}{T_H}$. Погрешность невелика и колеблется в пределах от 0,4% до 3,2%. Однако, после выбора электродвигателя возможно определение фактической частоты вращения $n_{ст}$, соответствующей моменту статического сопротивления $T_{ст}$ и уточнение формулы (8) после введения поправки:

$$t_{по} = \frac{1}{(m-1)*0,5+(1-a)+ (1-a)*\left(\frac{n_{ст}}{n_H}-1\right)*0,5} \quad (9).$$

Так как пусковые характеристики близки к линейным, а при ступенчатом регулировании большая часть площади F_k/F_n определяется величиной $0,5(m-1)$, структура формулы (8). не зависит от числа ступеней при реостатном пуске при условии $T_{min}=T_n$, $T_{max}=T_n * m_k$.

Для оценки целесообразности применения разработанной формулы (8) выполнен расчет относительного времени пуска по известной формуле (5) при различных значениях коэффициента $m=\frac{T_{max}}{T_n}$. Параметр m принят равным $m= 2$ и $m= 2,2$ (обычно приводят в каталогах) и $m=2,077$ (для пусковой характеристики, приведенной на рис.3а).

Таблица 4. Относительное время пуска, рассчитанное по формуле $t_{по} \cong \alpha + \frac{2,5}{m \cdot \sqrt{m}}$.

$\frac{T_{cm}}{a=T_n}$	0,02	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
t_{no} ($m=2$)	0,92	0,94	0,99	1,09	1,19	1,29	1,39	1,49	1,59	1,69	1,79	1,89
t_{no} ($m=2,077$)	0,87	0,9	0,95	1,05	1,15	1,25	1,35	1,45	1,55	1,65	1,75	1,85
t_{no} ($m=2,2$)	0,86	0,89	0,94	1,04	1,14	1,24	1,34	1,44	1,54	1,64	1,74	1,84

Из представленных данных следует, что расчетные значения $t_{по}$ (табл. 3) близки к значения по известной формуле (табл. 4) только при соотношении $\frac{T_{ст}}{T_n}=1$ ($T_{cm} = T_n$). При снижении статической нагрузки расчет относительного времени пуска $t_{по}$ по известной формуле (5) дает завышенные значения $t_{по}$, примерно на 20-25%, С учетом поправки в формуле (10) относительное время пуска, рассчитанное в по известной формуле (5) дает завышенные значения $t_{по}$, примерно на 30-35%, Требуемая мощность, рассчитанная по формулам (1,2) растет на 30-35%, уменьшается время пуска t_n и увеличивается ускорение, что вызывает дополнительные динамические нагрузки.

При двухступенчатом запуске электродвигателя с фазным ротором, если удастся рассчитать сопротивления реостата из условия, при котором минимальный пусковой момент равен номинальному ($T_{пуск.min}=T_n$), а максимальный пусковой момент равен критическому ($T_{пуск.max} = mT_n$), вид формулы (8) не изменяется. Если эти условия не удастся соблюсти и сопротивление реостата выбирают из условия: $T_{пуск.min}= T_2>T_n$, $T_{пуск.max} =T_1 < T_{max}= mT_n$, при этом $T_1 > T_2$. то численное интегрирование выполняется в интервале от T_1/T_n до T_2/T_n .

На рис.3б приведена пусковая характеристика при двух ступенчатом регулировании по моменту от $T_1/T_n=2,7$ до $T_2/T_n=1,54$. При обработке пусковых характеристик на рис. 3б

Значения относительного времени пуска $t_{по}$, полученные численным интегрированием пусковой характеристики (рис. 3б), приведены в табл. 5.

Таблица 5. Относительное время пуска $t_{по}$ в зависимости от загрузки ($\frac{T_{ст}}{T_H}$) при изменении относительного момента от $T_1/T_H=2,7$ до $T_2/T_H=1,54$

$\frac{T_{см}}{T_H}$	0,01	0,02	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$t_{по}$	0,47	0,476	0,48	0,49	0,52	0,55	0,58	0,62	0,65	0,69	0,75	0,8	0,87

Аналогично формуле (8) получено выражение для расчета относительного времени пуска в зависимости от кратности загрузки двигателя a при регулировании пускового момента от T_1/T_H до T_2/T_H :

$$t_{по} = \frac{1}{\left(\frac{T_1}{T_H} - \frac{T_2}{T_H}\right) * 0,5 + \frac{T_2}{T_H} - a} \quad (10)$$

Структура формул (8) и (10) одинаковая. Формулы отличаются величиной минимального и максимального момента при отключении сопротивлений. Для оценки целесообразности применения формулы (10) выполнены расчеты, результаты которых приведенные в табл. 6.

Таблица 6. Относительное время пуска $t_{по}$ в зависимости от загрузки ($\frac{T_{ст}}{T_H}$) при изменении относительного момента от $T_1/T_H=2,7$ до $T_2/T_H=1,54$, выполненные по формуле $t_{по} = \frac{1}{\left(\frac{T_1}{T_H} - \frac{T_2}{T_H}\right) * 0,5 + \frac{T_2}{T_H} - a}$

$\frac{T_{см}}{T_H}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$t_{по}$	0,49	0,52	0,55	0,58	0,62	0,66	0,7	0,76	0,82	0,89

Значения $t_{по}$, приведенные в табл. 5 и 6, очень близки, поэтому формула (10) может быть использована в предварительных расчетах.

Сравнение данных табл. 2, 3 при трехступенчатом пуске с данными табл. 5, 6 при двухступенчатом пуске показывает, что при малых значениях $a = \frac{T_{ст}}{T_H}$ для выбранного электродвигателя ускорение больше при двухступенчатом пуске, если $T_2 > T_H$, $T_1 < T_{max}$. Поэтому предпочтительным является трехступенчатый пуск при $T_{пуск.min} = T_H$, $T_{пуск.max} = T_{max} = m T_H$.

Мощность электродвигателя определяется относительным временем пуска $t_{по}$, рассчитываемым по пусковым характеристикам в зависимости от отношения момента статического сопротивления к номинальному моменту $\frac{T_{ст}}{T_H}$. Уточнение относительного времени пуска для двигателей с короткозамкнутым ротором с помощью коэффициента ρ дает возможность использовать двигатель значительно меньшей мощности. Если отношение $\frac{T_{ст}}{T_H} < 0,1$, то можно использовать двигатель с мощностью, уменьшенной на 50% и более. Для фазных электродвигателей разработаны формулы (9,10) для расчета относительного

времени пуска. При отношении $\frac{T_{ст}}{T_n} < 0,1$ можно, используя формулы (9,10), уменьшить расчетную мощность электродвигателя на 30%.

При использовании двигателя меньшей мощности увеличивается продолжительность времени пуска t_n . Время пуска ограничивается несколькими секундами, поэтому, если продолжительность реального цикла работы механизма значительно больше, то увеличение времени пуска на несколько секунд незначительно влияет на длительность цикла. Однако уменьшение мощности двигателя, позволяет экономить электроэнергию и улучшить условия работы оборудования, а в некоторых случаях отказаться от устройства для предохранения от перегрузок.

Выводы

1. По результатам численного интегрирования пусковых характеристик электродвигателей уточнены формулы для определения относительного времени пуска. Разработанные формулы позволяют более точно определить мощность электродвигателя, механизмов с большими инерционными массами и малыми моментами статического сопротивления.

2. Показано, что для механизмов с большими инерционными массами и малыми моментами статического сопротивления возможно использование электродвигателей меньшей мощности (в 1.2-1,5 раз) и снижение динамических нагрузок при пуске.

3. Трехступенчатый реостатный пуск двигателей с фазным ротором предпочтительней двухступенчатого пуска.

Список литературы

1. Лихачев В. Л. Электродвигатели асинхронные. М.: Изд.-во СОЛОН-Пресс, 2003, 303с.
2. Байков Б.А., Богачев В.Н., Смелянская Л.И. Задачи проекта по подъемно-транспортным машинам в системе конструкторской подготовки студентов технологических специальностей // Подъемно-транспортное дело. 2012. №1. С.25-26.
3. Брускин Д. Э., Зорохович А. Е., Хвостов В.С. Электрические машины и микромашины: учебник для электротехнических специальностей вузов. М.: Высшая школа, 1990. 580 с.
4. Борисов Ю. М., Соколов М. М. Электрооборудование подъемно-транспортных машин. М.: Машиностроение, 1958, 74 с.
5. Александров М. П. Грузоподъемные машины: учебник для вузов. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, Высшая школа, 2000. 550 с.
6. Снесарев Г. А., Тибанов В. П., Зябликов В. М. Расчет механизмов кранов: учебное пособие / Под ред. Д. Н. Решетова. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1994. 58 с.

Calculation of Machine Motor Power with High Inertia Masses and the Small Moments of Static Resistance

V.N. Bogachev¹, L.M. Puchkova^{1,*}

*puchkova-pk-3-2014@mail.ru

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: lifting machine, electric motor, power, moment, rotation frequency, start ability, acceleration, time

To determine the motor power required for providing the specified machine acceleration there is a need to know the relative start time. The known formulas are obtained by numerical integration of the starting characteristics of motors provided that the acceleration process ends when the motor accelerates to nominal speed. In real terms the acceleration process ends when the rotor speed corresponds to the static moment of friction forces.

This paper provides numerical integration of the starting characteristics of asynchronous motors with the cage and wound rotor and presents curves of calculated relative start time, taking into account the static load.

When calculating the required power of the motor, which runs in the mode of frequent starts and stops in the mechanisms that have high inertia loads and small moments of static resistance it is possible to use the motors of lower power and lower the dynamic loads at start-up as by virtue of a small increase in start-up time calculated by the above formulas. It is shown that the three-stage rheostat start-up of slip-ring motors is more preferable than the two-stage start-up.

References

1. Likhachev V. L. *Elektroprivateli asinkhronnye* [Asynchronous electric motor]. Moscow, SOLON-Press Publ., 2003, 303 p. (in Russian).
2. Baikov B.A., Bogachev V.N., Smelyanskaya L.I. The carrying and lifting machinery project tasks in the engineer training system for the students of engineering specialties. *Pod'emno-transportnoe delo = Lift and transportation engineering*, 2012, no.1, pp.25-26. (in Russian).
3. Bruskin D. E., Zorokhovich A. E., Khvostov V.S. *Elektricheskie mashiny i mikromashiny* [Electric machines and micromachines]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1990, 580 p. (in Russian).

4. Borisov Yu. M., Sokolov M. M. *Elektrooborudovanie pod"emno-transportnykh mashin* [The electrical equipment of lifting-transport machines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1958, 74 p. (in Russian).
5. Aleksandrov M. P. *Gruzopod"emnye mashiny* [Hoisting machine]. Vysshaya shkola Publ., 2000, 550 p. (in Russian).
6. Snesarev G. A., Tibanov V. P., Zyablikov V. M. *Raschet mekhanizmov kranov* [Calculation of loaders mechanisms]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 1994, 58 p. (in Russian).