

К выбору электродвигателя механизмов горизонтального перемещения с учетом неустановившегося процесса при пуске

11, ноябрь 2015

Богачев В. Н.¹, Пучкова Л. М.^{1,*}

УДК: 621.86/87

¹Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

^{*}puchkovalm@mail.ru

Введение

Асинхронные двигатели широко применяют в приводах механизмов передвижения и поворота технологических кранов, электроталей и кран-балок там, где не требуется регулирование скорости или достаточно ступенчатого регулирования при пуске [1,2]. При пуске под нагрузкой двигатель должен обладать достаточной мощностью для преодоления сил инерции и трения. Если номинальная мощность выбранного двигателя больше мощности, рассчитанной с учетом инерционных нагрузок, то возможно чрезмерное раскачивание груза при пуске, возникновение дополнительных динамических нагрузок или пробуксовка колес [3]. Поэтому обычно вводят ограничение ускорения при пуске.

Мощность двигателя при разгоне (пуске) расходуется на преодоление сил трения (статического сопротивления) и сил инерции. Избыток мощности двигателя сверх той, которая необходима для преодоления сил трения, определяет ускорение при разгоне и продолжительность периода разгона. В реальных условиях процесс разгона заканчивается, когда частота вращения ротора соответствует статическому моменту от сил трения. Обычно в расчетах учитывают нагрузки от сил инерционных и от сил трения без учета пусковых характеристик двигателя, так как продолжительность пуска составляет несколько секунд и мало влияет на продолжительность цикла. Однако существует много механизмов, в которых продолжительность цикла не велика, а число включений в час составляет 60 и более. Поэтому время пуска двигателя существенно влияет на продолжительность цикла.

В настоящей работе поставлена задача получения расчетных зависимостей, которые могут позволить выбрать двигатель оптимальной мощности с точки зрения допускаемого ускорения при пуске, минимальной продолжительности пуска и проанализировать расчетные зависимости для выбора оптимального варианта.

В соответствии с законом сохранения энергии составлено уравнение движения в период разгона (пуска) для механизма, содержащего, как вращающиеся, так и поступательно движущиеся звенья (рис.1). От электродвигателя 1 через вращающиеся звенья 2, обозначенные индексом i , мощность передается поступательно движущимся звеньям 3, обозначенные индексом j .

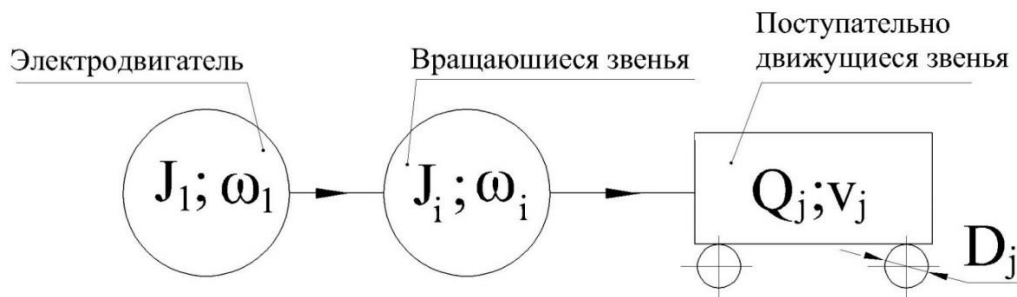


Рис. 1. Схема привода поступательно движущихся звеньев

Моменты, требуемые для движения вращающихся и поступательно движущихся звеньев, могут быть приведены к валу электродвигателя. Система имеет одну степень свободы и в соответствии с принципом Даламбера, после сложения моментов инерции отдельных звеньев и момента на преодоление сил трения получено уравнение моментов при пуске:

$$T_{\text{дв.к}} = T_{\text{ст}} + T_{\text{изб.п}}, \quad (1)$$

где $T_{\text{дв.к}}$ - текущий (т.е. в данный момент времени) вращающий момент, развиваемый электродвигателем в соответствии с пусковой характеристикой (рис. 2),

$T_{\text{ст}}$ - вращающий момент, необходимый для преодоления сил трения (статического сопротивления) всех звеньев, приведенный к валу электродвигателя.

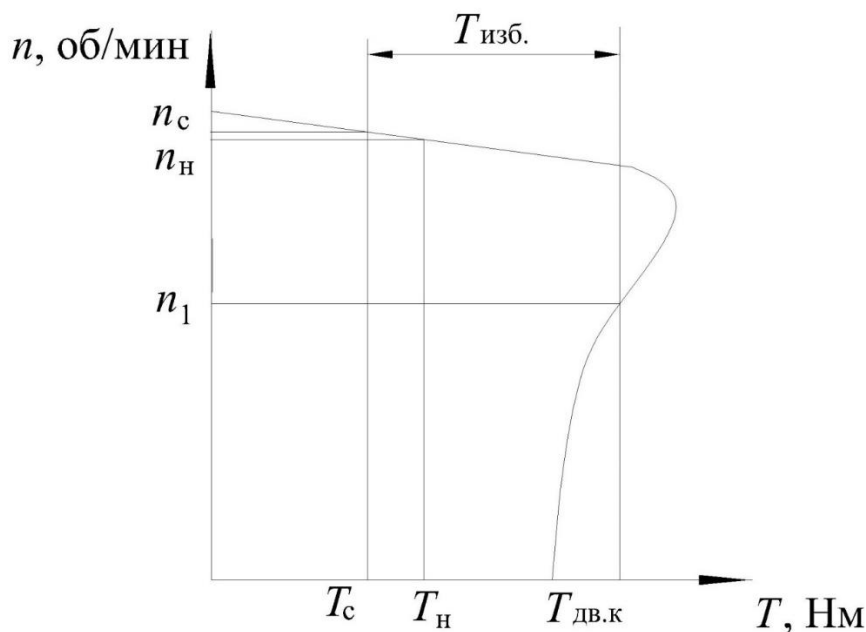


Рис.2. Пусковая характеристика асинхронного двигателя

В формуле (1) при пуске момент $T_{\text{изб.п}}$ является избыточным и он расходуется на преодоление сил инерции.

$$T_{\text{изб.п}} = \Sigma T_{\text{изб.п.}i} + \Sigma T_{\text{изб.п.}j}, \quad (2)$$

где $\Sigma T_{\text{изб.п.}i}$ – суммарный избыточный момент вращающихся масс, требуемый для преодоления сил инерции, приведенный к валу двигателя;

$\Sigma T_{\text{изб.п.}j}$ – суммарный избыточный момент поступательно движущихся масс, требуемый для преодоления сил инерции, и приведенный к валу двигателя.

Для каждого i -ого звена:

$$T_{\text{изб.}i} = \frac{T_i}{u_i \cdot \eta_i},$$

где T_i – момент инерции вращающихся звеньев с индексом i , u_i и η_i – соответственно передаточное число и КПД механизма между валом электродвигателя 1 и вращающимся i -ым звеном.

Для вращающихся i -ых звеньев:

$$T_i = J_i \cdot \frac{d\omega_i}{dt_{\text{п}}},$$

где: J_i – момент инерции массы вращающегося i -ого звена, ω_i – текущая угловая скорость вращающегося i -ого звена, $t_{\text{п}}$ – время пуска (разгона).

После приведения момента сил инерции к валу электродвигателя определен избыточный момент для вращающегося i -ого звена. С учетом соотношения $\omega_i = \frac{\omega_1}{u_i}$, получим:

$$T_{\text{изб.}i} = \frac{J_i}{u_i^2 \cdot \eta_i} \cdot \frac{d\omega_1}{dt_{\text{п}}}. \quad (3)$$

где: ω_1 – текущая угловая скорость вала электродвигателя.

Для каждого j -ого звена:

$$T_{\text{изб.}j} = \frac{T_j}{u_j \cdot \eta_j},$$

где: T_j – момент инерции поступательно движущихся j –ых звеньев, u_j и η_j – соответственно передаточное число и КПД механизма между валом электродвигателя 1 и колесом поступательно движущегося j -ого звена (рис.1).

Поступательно движущиеся элементы перемещаются на колесах. Момент на ведущих колесах для преодоления сил инерции поступательно движущихся j -ых звеньев, приведенный к валу электродвигателя:

$$T_j = F_j \cdot \frac{D_j}{2} \cdot \frac{1}{u_j \cdot \eta_j},$$

где: F_j – сила инерции массы поступательно движущегося j – ого звена, u_j и η_j – соответственно передаточное число и КПД механизма между валом электродвигателя 1 и валом приводных колес поступательно движущегося j -ого звена. D_j – диаметр ведущих приводных колес, поступательно движущихся j –ых звеньев,

$$F_j = \frac{G_j}{g} \cdot \frac{dv_j}{dt_{\text{п}}},$$

где: G_j – вес поступательно движущегося звена, g – ускорение свободного падения,
 v_j и t_{π} – соответственно текущая скорость и переменный промежуток времени.

Момент на ведущих колесах для преодоления сил инерции поступательно движущихся звеньев:

$$T_j = \frac{G_j \cdot D_j}{2 \cdot g \cdot u_j \cdot \eta_j} \cdot \frac{dv_j}{dt_{\pi}},$$

С учетом линейной скорости поступательно движущихся звеньев, приведенной к валу двигателя $v_j = \frac{\omega_1 \cdot D_j}{u_j \cdot 2}$, определен избыточный момент j -ых звеньев.

$$T_{\text{изб. } j} = \frac{G_j \cdot D_j^2}{4 \cdot g \cdot u_j^2 \cdot \eta_j} \cdot \frac{d\omega_1}{dt_{\pi}}. \quad (4)$$

После подстановки формул (3 и 4) в уравнение (2) получим в общем виде уравнение для определения избыточного вращающего момента на валу двигателя 1 для разгона всех вращающихся и поступательно движущихся звеньев механизма при пуске:

$$T_{\text{изб.п}} = \sum T_{\text{изб. } i} + \sum T_{\text{изб. } j} = \left(\sum \frac{J_i}{u_i^2 \cdot \eta_i} + \frac{1}{4 \cdot g} \sum \frac{G_j \cdot D_j^2}{u_j^2 \cdot \eta_j} \right) \frac{d\omega_1}{dt_{\pi}}$$

$$T_{\text{изб.п}} = J_{\text{пр.п}} \frac{d\omega_1}{dt_{\pi}}, \quad (5)$$

где $J_{\text{пр.п}} = \sum \frac{J_i}{u_i^2 \cdot \eta_i} + \frac{1}{4 \cdot g} \sum \frac{G_j \cdot D_j^2}{u_j^2 \cdot \eta_j}$ – приведенный момент инерции при пуске.

Момент, который развивает двигатель при пуске, определяется пусковой характеристикой. Обозначим отношение текущего момента $T_{\text{дв.к}}$ в период пуска к номинальному моменту $T_{\text{н}}$:

$$m_k = \frac{T_{\text{дв.к}}}{T_{\text{н}}}.$$

Этот коэффициент характеризует перегрузочную способность двигателя при пуске. Тогда текущий момент на валу электродвигателя при пуске:

$$T_{\text{дв.к}} = m_k \cdot T_{\text{н}}. \quad (6)$$

При установившемся движении мощность двигателя расходуется на преодоление сил трения, препятствующих движению. Загрузку двигателя по моменту после окончания разгона можно оценить коэффициентом загрузки:

$$\alpha = \frac{T_{\text{ст}}}{T_{\text{н}}}.$$

При расчете $T_{\text{ст}}$ не учтено изменение коэффициента трения в зависимости от скорости и влияние сил трения покоя. Так как разгон электродвигателя длится несколько секунд, коэффициент α принимают постоянным:

$$T_{\text{ст}} = \alpha \cdot T_{\text{н}} \quad (7)$$

После подстановки в уравнение (1) формул (5, 6 и 7) и выполнения преобразований, получено уравнение:

$$J_{\text{пр.п}} \frac{d\omega_1}{dt_{\text{п}}} = (m_k - \alpha) T_{\text{н}}, \quad (8)$$

Угловая скорость $\omega_1 = \frac{\pi \cdot n_1}{30}$, (n_1 - текущая частота вращения электродвигателя при разгоне в мин^{-1}). Из формулы (8) получено уравнение неустановившегося движения при пуске:

$$dt_{\text{п}} = \frac{\pi}{30} \cdot \frac{J_{\text{пр.п}}}{T_{\text{н}}} \cdot \frac{dn_1}{m_k - \alpha}. \quad (9)$$

Уравнение (9) универсально, так как выведено в общем виде, пригодно для расчета любого механизма грузоподъемной машины и может быть использовано для расчета времени пуска и уточнения механической мощности двигателя для преодоления инерционных нагрузок при разгоне с заданным ускорением.

В существующих методиках расчета [4,5] принято, что процесс пуска заканчивается при номинальном моменте на валу электродвигателя. В ранее проведенной работе [6] показано, что если в расчетах учитывать, что период пуска фактически заканчивается при моменте на двигателе, соответствующем моменту статического сопротивления, то расчетную мощность двигателя можно уменьшить.

Границы интегрирования от $n_1=0$ до $n_1=n_{\text{ст.}}$ определены из условия: процесс разгона заканчивается тогда, когда двигатель разгоняется до частоты вращения, соответствующей моменту статического сопротивления:

$$t_{\text{п}} = \int_0^{n_{\text{ст}}} dt_{\text{п}} = \frac{\pi}{30} \cdot \frac{J_{\text{пр.п}}}{T_{\text{н}}} \int_0^{n_{\text{ст}}} \frac{dn_1}{m_k - \alpha}. \quad (10)$$

Интеграл можно определить методом численного интегрирования в зависимости от пусковой характеристики двигателя, введя понятие относительного времени пуска ($t_{\text{по}}$):

$$\int_0^{n_{\text{ст}}} \frac{dn_1}{m_k - \alpha} = n_{\text{н}} t_{\text{по}}. \quad (11)$$

В работе [6] приведены таблица и формулы для расчета относительного времени пуска ($t_{\text{по}}$), полученные методом численного интегрирования для асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым и фазным ротором.

Подставив в выражение (10) значение интеграла (11), выраженное через относительное время пуска $t_{\text{по}}$, определяют время пуска в секундах для предварительно выбранного электродвигателя:

$$t_{\text{п}} = \frac{\pi}{30} \cdot \frac{J_{\text{пр.п}}}{T_{\text{н}}} \cdot n_{\text{н}} \cdot t_{\text{по}}. \quad (12)$$

Время пуска ограничено допускаемым ускорением [a].

Среднее ускорение при пуске в м/с^2 :

$$a = \frac{v}{60 \cdot t_{\text{п}}}, \quad (13)$$

Для механизмов горизонтального перемещения с гибким подвесом груза ускорение нормируется в зависимости от типа грузоподъемной машины (ГПМ) и массы груза [3]. Для технологических ГПМ [a] $\approx 0,1 \dots 0,3 \text{ м/с}^2$.

По заданному ускорению определяют время пуска:

$$t_{\text{п}} = \frac{v}{60 \cdot [a]}.$$

Преобразовав формулу (12), получают формулу для расчета, требуемого момента с учетом инерционных нагрузок при пуске с заданным ускорением:

$$T = \frac{\pi \cdot J_{\text{пр.л}} \cdot n_{\text{н}} \cdot t_{\text{по}}}{30 \cdot t_{\text{п}}} \quad (14)$$

и рассчитывают требуемую механическую мощность:

$$P'_{\text{н}} = \frac{T \cdot n_{\text{н}}}{9550}, \quad (15)$$

Фактически повышенный пусковой момент электродвигателя (частота вращения изменяется от 0 до $n_{\text{ст}}$) расходуется на преодоление сил инерции, определяет время и ускорение при пуске.

При выборе электродвигателя рассчитывают статическую мощность $P_{\text{ст}}$, расходуемую на преодоление сил трения. Статическая мощность, приведенная к валу электродвигателя, $P_{\text{ст}} = \frac{F_{\text{ст}} \cdot v}{60000 \cdot \eta}$ расходуется на преодоление сил трения при контакте ходовых колес и роликов с рельсами, направляющими и в подшипниках ($F_{\text{ст}}$, v , η – соответственно сила, линейная скорость и КПД механизма передвижения на выходном звене – ходовое колесо).

Электродвигатель выбирают из условия $P_{\text{н}} \geq P_{\text{ст}}$ ($P_{\text{н}}$ – мощность, приведенная в каталоге). При этом мощность $P'_{\text{н}}$, рассчитанная по формуле (15), и статическая мощность $P_{\text{ст}}$ могут существенно отличаться ($P'_{\text{н}} \geq P_{\text{ст}}$).

Электродвигатель выбирают предварительно из условия:

$$P'_{\text{н}} \geq P_{\text{н}} \geq P_{\text{ст}}, \quad (16)$$

Если двигатель выбран из условия $P'_{\text{н}} > P_{\text{н}}$, то время пуска может существенно увеличиться, а при установившемся процессе двигатель будет существенно недогружен.

Целесообразно выбирать двигатель из условия $P_{\text{н}} \approx P_{\text{ст}}$.

Так как в предварительном расчете не известно фактическое значение коэффициента загрузки $\alpha = \frac{T_{\text{ст}}}{T_{\text{н}}}$, то после выбора электродвигателя по условию (16) выполняют второй расчет времени пуска по формуле (12), ускорения по формуле (13) и сравнивают расчетное ускорение с допускаемым.

Если второе расчетное ускорение превышает допускаемое, то выбирают электродвигатель меньшей мощности. Если расчетное ускорение значительно меньше допускаемого, то выбирают электродвигатель большей мощности, тогда при выполнении условия (16) ускорение при пуске не будет превышать допускаемого $[a]$, не происходит чрезмерное раскачивание груза при пуске или пробуксовка колес по направляющим.

Формула (14) удобна для анализа влияния пусковой характеристики двигателя на момент и соответственно мощность (15) при разгоне с заданным ускорением. Она выведена

без привязки к закономерности изменения момента при пуске. Применяя метод численного интегрирования для уравнения (11), формулу (14) можно использовать для любых типов двигателей с известной пусковой характеристикой. Кроме того, как показано ранее [6], уточняя относительного времени пуска возможно использовать двигатель значительно меньшей мощности (на 30- 50%), если отношение $\frac{T_{ст}}{T_H} < 0,1$.

Заключение

1) Получено универсальное уравнение неустановившегося движения при пуске:

$dt_{п} = \frac{\pi}{30} \cdot \frac{J_{пр.п}}{T_H} \cdot \frac{dn_1}{m_k - \alpha}$, которое можно использовать для любых типов двигателей с известной пусковой характеристикой.

2) На основе уравнения неустановившегося движения при пуске разработана формула для расчета момента и мощности при пуске с учетом инерционных нагрузок.

3) Показано, что, изменяя мощность двигателя, можно изменить время пуска, ускорение при пуске, оптимизировать условия работы механизмов при пуске, влияя на продолжительность цикла.

Список литературы

- [1]. Лихачев В.Л. Электродвигатели асинхронные. М.: СОЛОН-Пресс. 2003. 303с.
- [2]. Брускин Д.Э., Зорохович А.Е., Хвостов В.С. Электрические машины и микромашины: Учебник для электротехнических специальностей вузов. 3-е изд. перераб. и доп. М.: Высшая школа. 1990. 528 с.
- [3]. Александров М.П. Грузоподъемные машины: Учебник для вузов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана - Высшая школа. 2000. 552 с.
- [4]. Снесарев Г.А., Тибанов В.П., Зябликов В.М. Расчет механизмов кранов / Под ред. Д.Н. Решетова: Учебное пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана - Высшая школа. 1994. 60 с.
- [5]. 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.
- [6]. Богачев В.Н., Пучкова Л.М. Расчет мощности электродвигателя механизмов с большими инерционными массами и малыми моментами статического сопротивления. // Машины и установки: проектирование, разработка и эксплуатация. Эл. журнал МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2015. №5. DOI:10.7463/apits.0515.0821924.