

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА МОЩНОСТИ ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ ПРИВОДА МЕХАНИЗМОВ ПРИ КРАТКОВРЕМЕННЫХ РЕЖИМАХ НАГРУЖЕНИЯ

11, ноябрь 2016

Пучкова Л. М.^{1,*}

УДК: 621.86/87

¹Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

[*puchkovalm@mail.ru](mailto:puchkovalm@mail.ru)

Введение

При работе механизмов в условиях частых кратковременных пусков и остановок продолжительность времени пуска, торможения соизмерима с продолжительностью установившегося движения. Такие механизмы используют в грузоподъемных машинах и в робототехнике для перемещения предметов на небольшие расстояния. При этом длительность периода пуска близка к продолжительности всего цикла перемещения.

Ускорение в период пуска определяет величину инерционных нагрузок и его часто ограничивают либо из условия уменьшения динамических нагрузок на металлоконструкцию или из других требований, предъявляемых к механизму, например, для предотвращения чрезмерного раскачивания груза. Расчет мощности привода выполняют, исходя из условия преодоления сил статического сопротивления (трения) и инерционных нагрузок. Существует достаточно большое количество механизмов, в которых момент для преодоления сил трения значительно меньше момента для преодоления инерционных нагрузок. К таким механизмам можно отнести механизмы поворота кранов, звенья манипуляторов, у которых опорами являются подшипники качения. Обычно выбирают двигатель повышенной мощности. Для уменьшения динамических нагрузок ограничивают ускорение при пуске, а для исключения возможных перегрузок при пуске устанавливают предохранительную муфту или применяют различные средства регулирования.

* * *

При перемещении предмета на небольшие расстояния (поступательное или вращательное движение) продолжительность периода разгона и торможения обычно близка к продолжительности установившегося движения или перемещение происходит только при пуске и торможении. При кратковременных циклах нагружения график скоростей при равноускоренном (равнозамедленном) движении имеет вид трапеции или треугольника (рис.1а) [1]. Площадь, ограниченная графиком скоростей и осью координат, соответству-

ет величине линейного S или углового φ перемещения в конце цикла работы механизма. Период установившегося движения возможен только, если график скоростей имеет вид трапеции. Если трапецеидальный график скоростей преобразуется в треугольный, то фактически двигатель работает постоянно в условиях неустановившегося движения.

Для обеспечения лучших условий работы металлоконструкции и снижения расхода энергии желательно период установившегося движения выполнить продолжительным. В период разгона требуется повышенная мощность для преодоления сил инерции и сил трения, при установившемся движении мощность расходуется только на преодоление сил трения, поэтому целесообразно стремиться к трапецеидальному графику скоростей.

При трапецеидальном законе поступательного движения (разгон-установившееся движение–торможение) перемещения определяют (рис. 1а):

$$S_p = \frac{v \cdot t_p}{2}, S_y = v \cdot t_y, S_T = \frac{v \cdot t_T}{2},$$

где: S_p, S_y, S_T – перемещения соответственно при разгоне (пуске), установившемся движении и торможении,

v - скорость при установившемся движении,

t_p, t_y, t_T - время соответственно при разгоне(пуске), установившемся движении и торможении.

Полное перемещение в течение цикла: $S = S_p + S_y + S_T$.

Принимая ускорение при пуске и торможении одинаковым, из графика скоростей (рис. 1а) определяют время пуска и торможения:

$$t_p = t_T = \frac{v}{a},$$

где a - ускорение (замедление) при пуске (торможении).

При кратковременных пусках принимают движение равноускоренным и равнозамедленным. Кроме того, при построении графика скоростей необходимо учитывать пусковую характеристику двигателя и рассчитывать ускорение, с использованием уравнения неустановившегося движения [2,3].

Из условия ограничения допускаемого ускорения при пуске, учитывая пусковую характеристику двигателя [2,3], определяют полное перемещение $S = \frac{v^2}{a} + v \cdot t_y$, или, задавая требуемую величину полного перемещения S , рассчитывают длительность периода установившегося движения из формулы:

$$t_y = \frac{S - \frac{v^2}{a}}{v}. \quad (1)$$

Продолжительность цикла $t_{ц}$ (рис. 1а):

$$t_{ц} = t_p + t_y + t_T = \frac{v \cdot t_p}{2} + v \cdot t_y + \frac{v \cdot t_T}{2}.$$

$$t_{ц} = \frac{1}{v} * (S + \frac{v^2}{a}). \quad (2)$$

Для заданной величины конечного перемещения S и ускорения a в координатах $v-t$ может быть построено множество трапеций и только один треугольник. Если периода

установившегося движения нет, скорость достигает максимального значения и после периода разгона сразу начинается торможение (рис. 1а), тогда по заданному перемещению:

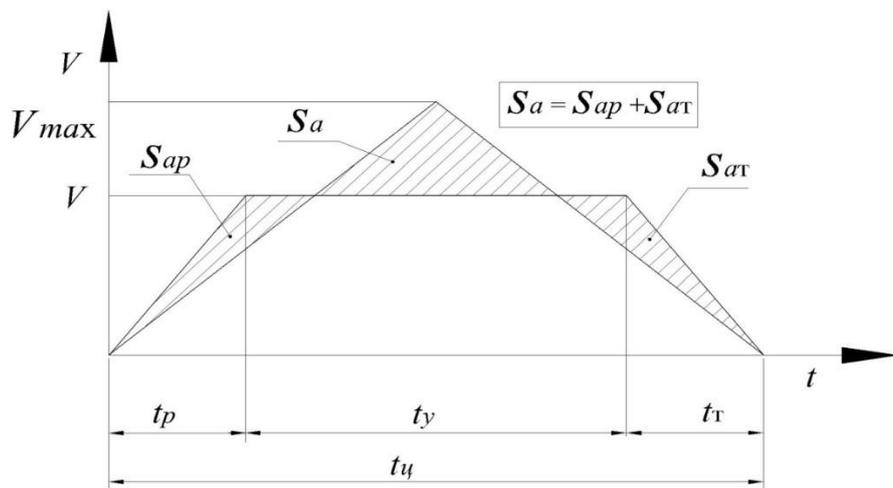
$$S = \frac{v_{max} * t_p}{2} + \frac{v_{max} * t_T}{2} = \frac{v_{max}^2}{a},$$

устанавливают максимально возможную скорость:

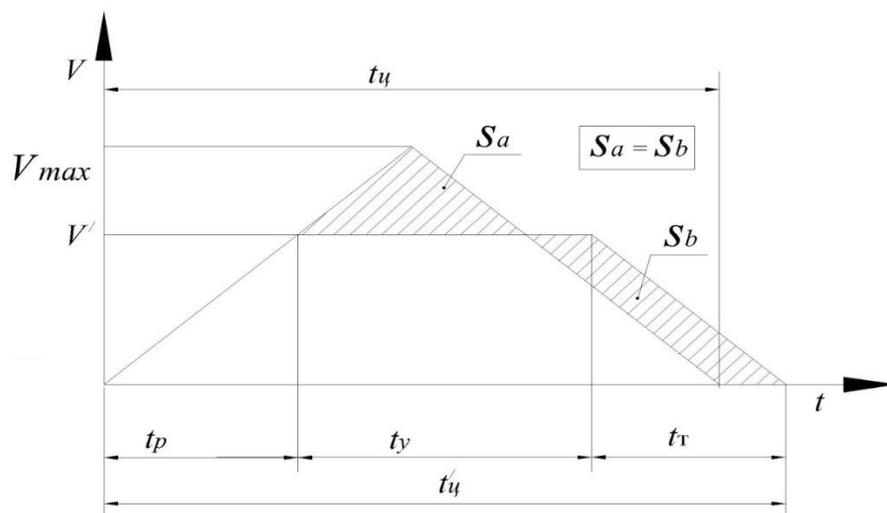
$$v_{max} = \sqrt{S * a}, \tag{3}$$

и время цикла:

$$t_{ц} = \frac{2 * v_{max}}{a}. \tag{4}$$



а)



б)

Рис. 1. Изменение графика скоростей при сохранении величины полного перемещения S :
а) при увеличении ускорения при пуске, б) при увеличении продолжительности цикла.

При вращательном движении можно рассматривать тот же график скоростей, построенный в зависимости от окружной скорости $v = \omega * R$ или в координатах $\omega - t$,

ω - угловая скорость,

R - расстояние от оси поворота до позиции, для которой выполняют расчет.

Площадь, ограниченная графиком скорости и осью абсцисс, пропорциональна углу поворота предмета - φ . Так как окружная скорость равна $v = \omega * R$, то можно задавать окружное ускорение a и определять время пуска, установившегося движения и торможения, так же, как в прямолинейном движении.

$$t_p = t_m = \frac{v}{a} = \frac{\omega * R}{a}.$$

Продолжительность цикла, если есть период установившегося движения при повороте на угол φ :

$$t_{\text{ц}} = t_p + t_y + t_r = \frac{\omega * R * t_p}{2} + \omega * R * t_y + \frac{\omega * R * t_r}{2}.$$

$$t_{\text{ц}} = \frac{1}{\omega} * (\varphi + \frac{\omega^2 * R}{a}). \quad (5)$$

Если периода установившегося движения нет:

$$t_{\text{ц}} = \frac{2 * \omega_{\text{max}} * R}{a}. \quad (6)$$

Тогда максимальная угловая скорость при повороте на угол φ в отсутствии установившегося периода будет

$$\omega_{\text{max}} = \sqrt{\frac{\varphi * a}{R}}. \quad (7)$$

Линейные (S) и угловые (φ) перемещения определяют по размерам рабочей зоны. Ускорение a обычно задается предварительно из условия ограничения динамических нагрузок или из других ограничений, связанных с технологическим процессом и определяют из опыта эксплуатации. Тогда по формулам 3 и 7 можно рассчитать максимальную скорость линейную (v_{max}) или угловую (ω_{max}), а по формулам 4 и 6 можно рассчитать продолжительность цикла, если нет периода неустановившегося движения.

Так как работа происходит в условиях, когда необходимо преодолеть инерционные нагрузки при пуске, то при треугольном законе распределения скоростей в период цикла, требуется избыточная мощность двигателя, а при торможении повышенный тормозной момент. Кроме того, привод постоянно работает в режиме пуск-торможение.

Предпочтительным является привод, у которого трапецеидальный закон изменения скорости, поэтому, если возможно, увеличивают ускорение, не изменяя продолжительности цикла (рис.1а). После определения максимальной скорости для заданного перемещения и ускорения переходят к трапецеидальному закону изменения скорости.

Если увеличение ускорения может привести к недопустимым динамическим нагрузкам, то можно рассматривать ограничение (снижение) скорости v_{max} при окончании процесса пуска, но тогда увеличивается время цикла $t_{\text{ц}}$ (рис.1б).

Задавая более продолжительное время цикла, можно перейти от треугольного графика скоростей к трапецеидальному и получить период установившегося движения.

Скорость для установившегося процесса может быть рассчитана по формуле:

$$v = \frac{a * t_{\text{ц}}}{2} - \sqrt{(\frac{a * t_{\text{ц}}}{2})^2 - S * a} \quad (8)$$

- для линейных перемещений.

Или по формуле:

$$\omega = \frac{a \cdot t_{ц}}{2 \cdot R} - \sqrt{\left(\frac{a \cdot t_{ц}}{2 \cdot R}\right)^2 - \frac{\varphi \cdot a}{R}} \quad (9)$$

- для угловых перемещений.

Формируют период установившегося движения (рис.1б), уменьшая значение скорости ($v' < v_{max}$). Используя формулы 8 и 9, переходят от треугольного графика скоростей к трапецеидальному и, не изменяя величину полного перемещения, при снижении скорости, увеличивают продолжительность цикла. При снижении скорости с v_{max} до v' относительная продолжительность цикла $\frac{t'_{ц}}{t_{ц}}$ увеличится на $m = \frac{t'_{ц} - t_{ц}}{t_{ц}}$.

На графике скоростей заштрихованные площади S_a и S_b равны (рис.1б), поэтому из геометрических соотношений можно определить увеличение продолжительности цикла.

$$m = 0,5 * k^2 * \frac{1}{1-k}, \quad (10)$$

где

$$k = \frac{v_{max} - v'}{v_{max}}.$$

Формула 10 получена из условия: величина полного перемещения, ограниченная графиком скоростей, при снижении скорости не изменяется. Снижение скорости на 20% и 40 % незначительно увеличивает продолжительность цикла соответственно на 2,5% и 6,4%.

Увеличение времени работы механизма может быть целесообразным, если оно несущественно влияет на производительность и на расход энергии или дает существенную экономию энергетических затрат и благоприятно для снижения динамических нагрузок. Ранее в работе [2] было представлено уравнение неустановившегося движения, на основе которого можно рассчитать требуемую мощность при пуске с учетом инерционных нагрузок.

Для анализа целесообразности увеличения продолжительности цикла можно проанализировать известные формулы и оценить, как изменяются энергетические параметры: требуемая мощность, момент.

1. Понижение скорости окончания разгона обеспечивает пропорциональное снижение мощности $P_{СТ}$ при установившемся процессе для преодоления сил трения в подшипниках и в шарнирных опорах.

$$P_{СТ} = \frac{F_{СТ} \cdot v}{60000 \cdot \eta}, \quad (11)$$

где: $F_{СТ}$, v , η – соответственно сила, линейная скорость и КПД механизма на выходном звене.

Небольшое снижение скорости позволяет немного снизить требуемую статическую мощность.

2. Понижение скорости окончания разгона приводит к повышению передаточного отношения привода и понижению приведенного момента инерции при пуске:

$$J_{пр.п} = \sum \frac{J_i}{u_i^2 \cdot \eta_i} + \frac{1}{4 \cdot g} \sum \frac{G_j \cdot D_j^2}{u_j^2 \cdot \eta_j} \quad (12)$$

- приведенный момент инерции при пуске,

J_i - момент инерции массы вращающегося i -ого звена,

u_i и η_i - соответственно передаточное число и КПД механизма между валом двигателя и вращающимся i -ым звеном,

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,

G_j - вес поступательно движущегося звена,

g - ускорение свободного падения.

Если увеличивают передаточное число, то существенно снижают приведенный момент инерции при пуске и снижают время разгона (рис.1б). Момент, требуемый по условию разгона с заданным ускорением, если частота вращения двигателя n_n не изменяется.

$$T = \frac{\pi * J_{пр.п} * n_n * t_{по}}{30 * t_p}, \quad (13)$$

T - момент с учетом инерционных нагрузок при пуске с заданным ускорением,

n_n - номинальная частота вращения вала двигателя при номинальном моменте T_n .

$t_{по}$ - относительное время пуска.

Относительное время пуска $t_{по}$, которое определяется соотношением $\alpha = \frac{T_{ст}}{T_n}$ [3], практически не изменяется.

3. Если возможно снижение приведенного момента инерции при пуске путем увеличения передаточного числа, то можно обеспечить снижение требуемой мощности при разгоне с заданным ускорением P'_n с учетом инерционных нагрузок [2].

$$P'_n = \frac{T * n_n}{9550}. \quad (14)$$

Это особенно актуально, если перемещают грузы средней и большой массы так как при разгоне больших инерционных масс и небольшой статической мощности приходится увеличивать мощность двигателя для уменьшения времени пуска. Тогда становится эффективным небольшое снижение скорости, так как оно позволяет существенно снизить мощность двигателя, требуемую по условию разгона с заданным ускорением.

При снижении угловой скорости ω конечного выходного звена в $\sim 1,2$ или $\sim 1,4$ раза приведенный момент инерции $J_{пр.п}$ (12) снижается пропорционально квадрату соотношения скоростей $\frac{\omega_{max}}{\omega}$ ($\frac{v_{max}}{v}$) соответственно в $\sim 1,44$ и в $\sim 1,96$ раз, при этом время разгона t_p снижается пропорционально снижению скорости ω в $1,2 \dots 1,4$ раза. Момент (13), требуемый для разгона с заданным ускорением, уменьшается соответственно в $\sim 1,68$ и в $\sim 2,7$ раза. Требуемая мощность (14) для разгона привода с заданным ускорением будет снижена соответственно в $\sim 1,68 \dots \sim 2,7$ раза.

Расчеты показывают, что снижение скорости при окончании периода пуска на 20% и 40% увеличивает продолжительность цикла соответственно на 2,5% и 6,4% (рис.1б).

Таким образом, незначительное увеличение продолжительности цикла t_c позволяет существенно снизить мощность двигателя P'_n , выбрать оптимальные параметры привода и снизить массу привода и улучшить условия работы механизма и металлоконструкции.

При выполнении практических расчетов выбирают различные типы двигателей, поэтому значения P_n и n_n нельзя изменять произвольно. Кроме того, если статический момент $T_{ст}$ (момент от сил трения) может быть близким к моменту (T), требуемому для разгона с заданным ускорением, то снижение требуемой мощности может быть не таким эффективным.

Механизмы, в которых потери на трение ($T_{ст}$) не велики в сравнении с моментом, требуемым для разгона с заданным ускорением, можно изменить график скоростей с переходом от треугольного к трапецеидальному или увеличить продолжительности периода установившегося движения. При этом небольшое увеличение продолжительности цикла на ~3% позволяет существенно снизить требуемую мощность (в 2 раза и более), а это обуславливает возможность оптимизации размеров привода.

Для механизмов, у которых статический момент ($T_{ст}$) не существенно отличается от момента, требуемого для разгона с допустимым ускорением (T), увеличение продолжительности цикла на ~3% позволяет снизить расчетную мощность на ~20%.

В связи с изложенным для оптимизации расчетной мощности двигателя возможно путем небольшого увеличения продолжительности цикла, уменьшить скорость при установившемся движении, и выполнить расчет требуемой мощности с использованием уравнения неустановившегося мощности [2, 3].

Заключение

Для привода механизмов, предназначенных для перемещения предметов на небольшие расстояния при кратковременных режимах нагружения, на основе анализа графика скоростей, предложено выполнять корректировку продолжительности цикла для обеспечения установившегося периода движения.

1. Показана возможность оптимизации требуемой мощности путем увеличения времени цикла и снижения конечной скорости для механизмов, у которых основным исходным параметром является величина конечного перемещения.

2. Показано, что наличие периода установившегося движения или его увеличение обеспечивает значительное снижение требуемой мощности для механизмов с большими инерционными массами и малыми моментами статического сопротивления.

Список литературы

- [1]. Попов П.К. Промышленные роботы: Конспект лекций по курсу «Средства автоматизации подъемно-транспортных операций. Ч.1. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана - Высшая школа. 1986. 34 с.
- [2]. Богачев В.Н., Пучкова Л.М. К выбору электродвигателя для механизмов горизонтального перемещения с учетом неустановившегося процесса при пуске // Инженерный вестник. Электронный научно-технический журнал. МГТУ им. Н.Э. Баумана.

2015. №11. С.40-46. Режим доступа: <http://engsi.ru/doc/827012.html> (дата обращения: 1.11.2016)

- [3]. 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. 2015. № 5. С. 1-12. DOI: 10.7463/aplts.0515.0821924. Режим доступа: <http://maplantsjournal.ru/doc/821924.html> (дата обращения: 1.11.2016)