

# Расчет характеристик двигателей приводов

1. Егоров О. Д., Подураев Ю. В. Мехатронные модули. Расчет и конструирование: Учеб. пособие. – М.: МГТУ «СТАНКИН», 2004. – 360 с.
2. Норенков И. П. Основы автоматизированного проектирования: Учеб. для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. – 336 с.
3. Андрееenko С.И., Ворошилов, Петров. Проектирование приводов манипуляторов. Лен. Маш. 1975 г.

## Содержание лекции

1. Этапы выбора привода.
2. Режимы работы двигателей.
3. Расчет мощности двигателя.
4. Метод эквивалентных величин.
5. Пример выбора двигателя.
6. Пример выбора исполнительного двигателя.
7. Расчет параметров двигателя наземного робота.

## Этапы выбора привода - 1

Расчет приводов роботов состоит из основных трех этапов:

1. Методика и последовательность расчета
2. Выбор и обоснование типов двигателей
3. Расчет элементов приводов и мощности двигателей исполнительных органов.

После выбора типа привода ПР и, следовательно, вида исполнительных двигателей важной задачей является нахождение мощности двигателя и последующий выбор его конкретной модели.

Электропривод выбирают, исходя из следующих факторов:

- требуемых динамических свойств при пуске, торможении и изменении нагрузки;
- диапазона регулирования скоростей
- вида требуемой механической характеристики режима работы во времени и требуемой точности поддержания заданного режима;
- частоты включений приводного механизма.

## Режимы работы двигателей - 1

Определение мощности двигателя выполняется в соответствии с нагрузкой на его валу по условиям нагрева. После того как двигатель выбран по условиям нагрева по каталогу, его проверяют по перегрузочной способности и условиям пуска.

Завышение мощности двигателя связано с дополнительными капитальными затратами, увеличением расхода энергии на единицу продукции, а для асинхронных двигателей, кроме того, — с ухудшением коэффициента мощности.

По характеру работы все роботы разделяются на четыре основные группы:

- 1) роботы, работающие длительно с постоянной нагрузкой;
- 2) роботы, работающие длительно с изменяющейся нагрузкой;
- 3) роботы, часть времени производственного цикла работающие, другую часть находящиеся в неподвижном состоянии;
- 4) роботы, работающие всего несколько секунд или минут, а затем длительно (десятки секунд или минут) находящиеся в неподвижном состоянии (кратковременный характер работы).

В соответствии с характером работы роботов установлены три основных номинальных режима двигателей: продолжительный, повторно-кратковременный и кратковременный.

## Режимы работы двигателей - 2

Режимы работы двигателей представлены на рис. 1. При продолжительном режиме за время работы двигатель успевает нагреться до установившейся температуры. При повторно-кратковременном режиме за время работы  $t_p$  двигатель не успевает нагреться до установившейся температуры, а за время паузы  $t_0$ , когда он отключен от сети, не успеет охладиться до температуры окружающей среды. Однако по прошествии нескольких циклов температура будет колебаться между наибольшими и наименьшими значениями, которые далее остаются постоянными. Основной характеристикой этого режима является относительная продолжительность включения, %,

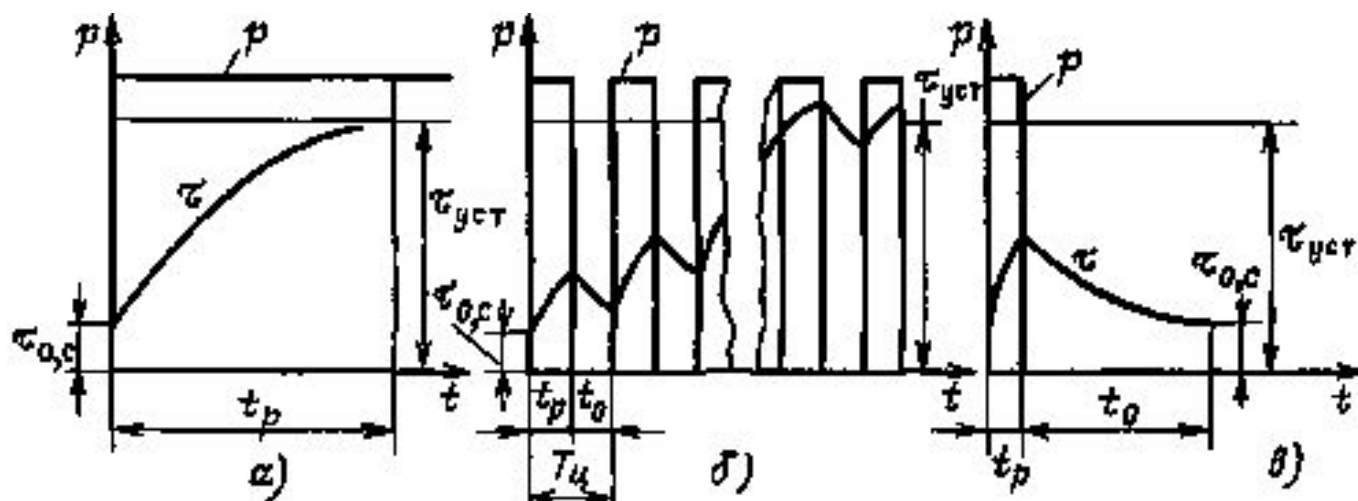


Рисунок 1 – Режимы работы двигателей

## Режимы работы двигателей - 3

$$\text{ПВ} = \frac{t_p}{t_p + t_0} 100 = \frac{t_p}{T_{\text{ц}}} 100,$$

где  $t_p$ ,  $t_0$ ,  $T_{\text{ц}}$  — соответственно интервалы работы, паузы и цикла.

Каждый двигатель может работать в любом из перечисленных режимов. Однако для получения наилучших экономических показателей электротехническая промышленность изготавливает двигатели, специально предназначенные для: а) продолжительного режима; б) повторно-кратковременного режима; в) кратковременного режима.

Для двигателей продолжительного режима в каталогах задается номинальная мощность без каких-либо оговорок о времени работы. Для двигателей повторно-кратковременного режима в каталогах указываются номинальные значения мощности соответственно для ПВ - 15, 25, 40 и 60%. При этом время цикла не должно превышать 10 мин. В противном случае режим работы считается продолжительным. Для двигателей кратковременного режима в каталогах задаются несколько времен работы и соответствующие им номинальные мощности.

## Расчет мощности привода - 1

В основе выбора мощности двигателя любого режима работы лежит метод средних потерь. Он основан на сравнении средних потерь мощности  $\Delta P_{\text{ср}}$  двигателя за цикл работы с потерями при номинальной нагрузке  $\Delta P_{\text{ном}}$ .

Средние потери определяются из выражения

$$\Delta P_{\text{ср}} = \frac{\Delta A_{\text{ц}}}{T_{\text{ц}}} = \frac{E = \sum_{i=1}^n \Delta P_i t_i + \sum_{i=1}^l \Delta A_i}{T_{\text{ц}}} \quad (1)$$

где  $\Delta A_{\text{ц}}$  - потери энергии в двигателе за цикл;  $T_{\text{ц}}$  - время цикла;  $\Delta P_i t_i$  - потери энергии в двигателе за время  $t_i$  в течение которого двигатель работает с неизменной нагрузкой  $P_i$ ;  $\Delta A_i$  - потери энергии при пуске и торможении.

Если средние потери за цикл работы не превышают потерь при номинальной нагрузке, то средняя температура двигателя не будет превышать допустимую и, следовательно, двигатель выбран правильно.

Таким образом, условия выбора двигателя

$$\Delta P_{\text{ср}} \leq \Delta P_{\text{ном}} \quad (2)$$

Использование метода средних потерь затруднено из-за отсутствия необходимых данных в каталогах

## Метод эквивалентных величин - 1

Метод эквивалентных величин использует нагрузочные диаграммы.

Метод эквивалентного тока основан на том, что действительный ток двигателя при разных нагрузках заменяется эквивалентным током неизменного значения  $I_{эк}$ , создающим за рабочий цикл те же потери в двигателе, что и действительный ток.

Потери мощности в двигателе складываются из постоянных (не зависящих от нагрузки)  $\Delta P_k$  и переменных  $\Delta P_c$  потерь:

$$\Delta P = \Delta P_k + \Delta P_c = \Delta P_k + I^2 r. \quad (3)$$

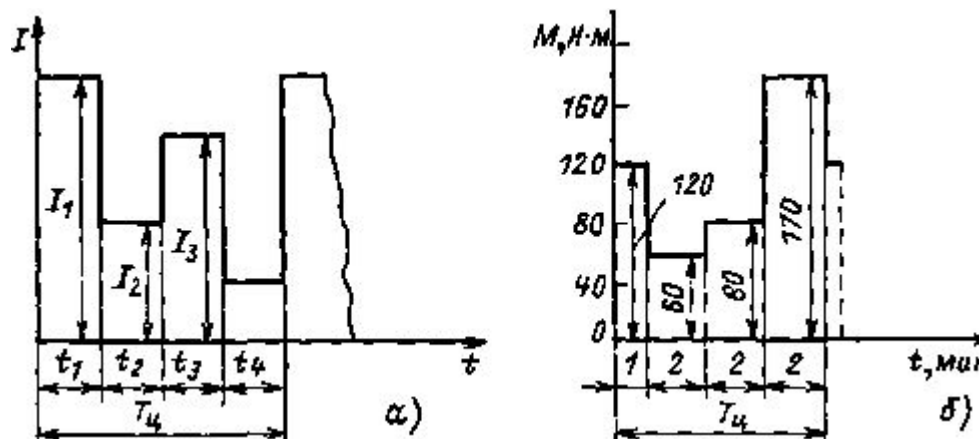


Рисунок 2 – Нагрузочные диаграммы двигателей



## Метод эквивалентных величин - 2

К постоянным относятся потери в магнитопроводе и механические потери, к переменным — потери в обмотках.

В двигателе постоянного тока с параллельным возбуждением к переменным потерям относятся потери в цепи якоря, остальные потери, в том числе и потери в обмотке возбуждения, являются постоянными. В асинхронном двигателе переменными потерями следует считать потери в обмотках ротора и статора.

Потери мощности в двигателе за цикл работы равны сумме потерь на каждом из участков (рис. 2а):

$$(\Delta P_{\text{к}} + I_1^2 r) t_1 + (\Delta P_{\text{к}} + I_2^2 r) t_2 + \dots = (\Delta P_{\text{к}} + I_{\text{эк}}^2 r) T_{\text{ц}}$$

$$\Delta P_{\text{к}} (t_1 + t_2 + t_3 + \dots) = \Delta P_{\text{к}} T_{\text{ц}}$$

$$I_1^2 r t_1 + I_2^2 r t_2 + I_3^2 r t_3 + \dots = I_{\text{эк}}^2 r T_{\text{ц}}$$

$$I_{\text{эк}} = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + I_3^2 t_3 + \dots}{T_{\text{ц}}}}$$

(4)

## Метод эквивалентных величин - 3

При правильном выборе двигателя должно соблюдаться условие

$$I_{\text{НОМ}} \geq I_{\text{ЭК}} \quad (5)$$

Учитывая, что для двигателей постоянного тока с параллельным возбуждением  $M = k_M \Phi I_{\text{я}} = C I_{\text{я}}$ , а для двигателей переменного тока  $M = C \Phi I_2 \cos \psi_2 \approx C_1 I_2$ , в зоне рабочей части характеристики (в области от  $s = 0$  до  $s \approx s_{\text{кр}}$ ) можно перейти от эквивалентного тока к эквивалентному моменту, если в (4) ток выразить через момент:

$$M_{\text{ЭК}} = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + M_3^2 t_3 + \dots}{T_{\text{ц}}}} \quad (6)$$

Тогда условие правильного выбора двигателя имеет вид

$$M_{\text{НОМ}} \geq M_{\text{ЭК}} \quad (7)$$

Для приводов, скорость двигателей которых не регулируется и мало зависит от нагрузки (ДПТ с параллельным возбуждением, асинхронные с короткозамкнутым ротором, синхронные) мощность пропорциональна моменту

$$P = \omega M \approx CM \quad (8)$$

## Метод эквивалентных величин - 4

Подставив момент из (9) в (7), получим эквивалентную мощность

$$P_{\text{эк}} = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + P_3^2 t_3 + \dots}{T_{\text{..}}}}, \quad (9)$$

Номинальная мощность должна удовлетворять условию

$$P_{\text{ном}} \geq P_{\text{эк}}. \quad (10)$$

После выбора двигателя его необходимо проверить по перегрузочной способности, исходя из условия:

$$M_{\text{max с}} \leq M_{\text{max д}}, \quad (11)$$

где  $M_{\text{max с}}$  – максимально возможный момент,  $M_{\text{max д}}$  – максимально допустимый момент.

Выбор двигателей не ограничивается только его номинальной мощностью. Необходимо учитывать также конструктивные особенности, компоновку, условия среды (влага, пыль, газы, взрывоопасные среды). В этой связи выпускают двигатели открытого, защищенного, закрытого и взрывобезопасного исполнения.

## Пример выбора двигателя - 1

Пусть нагрузочная диаграмма задана на рис. 2б. По технологическим условиям следует использовать асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором. Номинальная частота вращения 1450 об/мин. Помещение – сухое без пыли и грязи.

Решение. Рассчитаем эквивалентный момент

$$M_{\text{э}} = \sqrt{\frac{120^2 \cdot 1 + 60^2 \cdot 2 + 80^2 \cdot 2 + 170^2 \cdot 2}{1+2+2+2}} = 110 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (12)$$

Эквивалентная мощность равна

$$P_{\text{эк}} = \frac{M_{\text{э}}}{9550} = \frac{110 \cdot 1450}{9550} = 16,7 \text{ кВт}. \quad (13)$$

По условиям работы выбираем по каталогу двигатель ближайшей большей мощности. Каталожные данные: 17 кВт, 380/220 В, КПД=0,895,  $\cos(\varphi) = 0,88$ ,  $I_{\text{п}}=7I_{\text{ном}}$ ,  $M_{\text{п}}/M_{\text{ном}}=1,2$ ,  $M_{\text{max}}/M_{\text{ном}}=2$ ,  $n_{\text{ном}}=1430$  об/мин.

Номинальный момент двигателя:

$$M_{\text{ном}} = \frac{9550 P_{\text{ном}}}{n_{\text{ном}}} = \frac{9550 \cdot 17}{1430} = 113 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (14)$$

## Пример выбора двигателя - 2

Максимальный (критический) момент

$$M_{max} = \lambda M_{ном} = 2 \cdot 113 = 226 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (15)$$

Максимальный статический момент

$$M_c = 170 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (16)$$

По перегрузочной способности двигатель подходит, так как выполняется условие

$$0,9M_{max} = 204 > M_c = 170 \quad (17)$$

## Пример выбора исполнительного двигателя - 1

Определим потребленную мощность по параметрам выходного элемента механизма

$$P = \frac{F \cdot V}{\eta_{\text{общ.}}} \quad (18)$$

Где  $F$  - усилие сопротивления перемещению;  $V$  - скорость перемещения, м/с;  $\eta_{\text{общ}}$  - КПД всего механизма, равный произведению КПД передач, входящих в механизм  $\eta_{\text{общ}} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \dots \cdot \eta_n$ .

Пусть имеется 4 вида передач с КПД

0.96 - КПД зубчато-ременной передачи;

0.8 - КПД волновой передачи;

0.99 - КПД подшипников качения;

0.98 - КПД подшипников скольжения;

Тогда общий КПД равен

$$\eta_{\text{общ}} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot \eta_4 = 0.96 \cdot 0.8 \cdot 0.99 \cdot 0.98 = 0.745 \quad (19)$$

Пусть требуемое усилие равно 400 N, а скорость равна 0.6 м/с. Тогда

$$P = \frac{400 \cdot 0.6}{0.745} = 322.15 \text{ Вт} \quad (20)$$

Далее, используя изложенную выше методику, выбираем двигатель

## Расчет параметров двигателя наземного робота - 1

Для расчета минимально необходимой для движения частоты вращения двигателя воспользуемся формулой:

$$v = (2 \cdot \pi \cdot r \cdot n \cdot 3,6) / (i_{кп} \cdot i_{гп}) \quad (21)$$

где:  $v$  – скорость робота, км/ч; 3,6 – коэффициент перевода скорости из м/с в км/ч;  $r$  – радиус ведущего колеса, м;  $n$  – частота вращения вала двигателя, Гц;  $i_{кп}$  – передаточное число коробки передач или редуктора электродвигателя;  $i_{гп}$  – передаточное число главной передачи (при использовании редуктора принимается равным единице).

Из (21) получаем :

$$n = (v \cdot i_{кп} \cdot i_{гп}) / (2 \cdot \pi \cdot r \cdot 3,6)$$

Расчет максимального крутящего момента основан на формуле баланса сил, описывающей равноускоренное движение робота:

$$F_{тяги} = F_{кач.} + F_{под.} + F_{возд.} + F_{ин.} \quad (22)$$

где:  $F_{тяги}$  – сила тяги на ведущих колесах;  $F_{кач.}$  – сила трения качения колес;  $F_{под.}$  – сила сопротивления подъему;  $F_{возд.}$  – сила сопротивления воздуха;  $F_{ин.}$  – сила сопротивления разгону (сила инерции).

Раскроем силы в (22)

$$(\eta_{тр.} \cdot M_e \cdot i_{кп} \cdot i_{гп}) / r = f \cdot m \cdot g \cdot \cos \alpha + m \cdot g \cdot \sin \alpha + C_x \cdot S \cdot \rho \cdot v^2 / 2 + m \cdot a \cdot \sigma_{вр} \quad (23)$$

## Расчет параметров двигателя наземного робота - 2

где:  $\eta_{тр.}$  – коэффициент потери мощности в трансмиссии робота ( $\eta_{тр.}=0,9-0,92$ );  $M_e$  – эффективный крутящий момент двигателя, Н\*м;  $u_{кп}$  – передаточное число коробки передач;  $u_{гп}$  – передаточное число главной передачи;  $r$  – радиус ведущего колеса, м;  $f$  – коэффициент трения качения;  $m$  – масса робота, кг;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $\alpha$  – угол уклона дороги, °;  $C_x$  – коэффициент сопротивления воздуха (коэффициент обтекаемости), Н\*с<sup>2</sup>/(м\*кг).  $C_x$  определяется экспериментально для каждого робота.  $S$  – лобовая площадь робота, м<sup>2</sup>.  $\rho$  – плотность воздуха.  $v$  – расчетная скорость робота, км/ч;  $a$  – требуемое ускорение, м/с<sup>2</sup>, рассчитывается путем деления значения расчетной скорости на время  $t$ , требуемое на разгон до этой скорости;  $\sigma_{вр}$  – коэффициент учета вращающихся масс.

Преобразуем выражение (23)

$$M_e = (f * m * g * \cos \alpha + m * g * \sin \alpha + C_x * S * \rho * v^2 / 2 + m * (v / (3,6 * t)) * (1,05 + 0,05 * u_{кп}^2)) * r / (\eta_{тр.} * u_{кп} * u_{гп})$$

Номинальная мощность находится как произведение момента на скорость вращения двигателя.