

Расчет и выбор мощности электродвигателей для станков, машин и механизмов

Повный А. В., Гомельский государственный политехнический колледж

Сайт: <https://electricalschool.info/>

Какал в ТГ: <https://t.me/electricalschool>

Электронные учебные пособия: <https://electricalschool.info/e-textbooks.html>

Расчет мощности электродвигателя выполняют для того, чтобы двигатель надежно приводил механизм в движение, не перегревался, выдерживал пусковые и кратковременные перегрузки, обеспечивал необходимую скорость и момент и соответствовал условиям эксплуатации.

Мощность двигателя нельзя выбирать только по одному числовому значению. Необходимо учитывать рабочую нагрузку, скорость, КПД механической передачи, продолжительность работы, число пусков, характер нагрузки, условия охлаждения, требуемый пусковой момент и возможность регулирования скорости.

В общем виде выбор электродвигателя можно представить так:

Р_{двигателя} = мощность механизма с учетом потерь и запаса.

1. Основные величины

Механическая мощность показывает, какую работу выполняет механизм за единицу времени.

При поступательном движении используют формулу:

$$P = F \cdot v$$

где:

P — механическая мощность, Вт;

F — сила, Н;

v — скорость движения, м/с.

При вращательном движении используют формулу:

$$P = M \cdot \omega$$

где:

P — механическая мощность, Вт;

M — вращающий момент, Н·м;

ω — угловая скорость, рад/с.

Угловая скорость определяется так:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot n / 60$$

где:

n — частота вращения, об/мин;

$$\pi = 3,1416.$$

Если мощность нужно получить в киловаттах, а момент задан в Н·м, используют формулу:

$$P = M \cdot n / 9550$$

Отсюда вращающий момент равен:

$$M = 9550 \cdot P / n$$

В этой формуле:

P — мощность, кВт;

M — момент, Н·м;

n — частота вращения, об/мин.

Например, для двигателя мощностью 7,5 кВт и частотой вращения 1500 об/мин:

$$M = 9550 \cdot 7,5 / 1500$$

$$M = 47,75 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

Следовательно, номинальный момент двигателя равен 47,75 Н·м.

2. Учет КПД передачи

Двигатель передает мощность рабочему механизму через редуктор, муфту, ременную передачу, зубчатую передачу или винтовой механизм. В каждом элементе возникают потери энергии.

Если мощность на рабочем органе равна $P_{\text{раб}}$, а КПД передачи равен $\eta_{\text{п}}$, мощность двигателя определяется формулой:

$$P_{\text{дв}} = P_{\text{раб}} / \eta_{\text{п}}$$

Например, механизм должен получить 8 кВт, а КПД передачи равен 0,9:

$$P_{\text{дв}} = 8 / 0,9$$

$$P_{\text{дв}} = 8,89 \text{ кВт}$$

Следовательно, двигатель должен иметь мощность не менее 8,89 кВт без учета дополнительного запаса.

Если привод состоит из нескольких последовательно соединенных элементов, общий КПД определяется так:

$$\eta_{\text{общ}} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot \dots \cdot \eta_n$$

Например:

$$\eta_{\text{общ}} = 0,96 \cdot 0,97 \cdot 0,98$$

$$\eta_{\text{общ}} = 0,912$$

Если рабочему органу требуется мощность 10 кВт, мощность двигателя равна:

$$P_{\text{дв}} = 10 / 0,912$$

$$P_{\text{дв}} = 10,96 \text{ кВт}$$

В этом случае выбирают двигатель ближайшей большей стандартной мощности.

3. Коэффициент запаса

После расчета мощности вводят коэффициент запаса:

$$P_{\text{выб}} = k_z \cdot P_{\text{дв}}$$

где:

$P_{\text{выб}}$ — требуемая мощность выбранного двигателя, кВт;

k_z — коэффициент запаса;

$P_{\text{дв}}$ — расчетная мощность двигателя, кВт.

Обычно коэффициент запаса принимают от 1,1 до 1,3. Большой запас нужен при ударных нагрузках, тяжелом пуске, частых реверсах, неточности исходных данных и возможном увеличении нагрузки.

Например, если расчетная мощность равна 4,8 кВт, а коэффициент запаса равен 1,2:

$$P_{\text{выб}} = 1,2 \cdot 4,8$$

$$P_{\text{выб}} = 5,76 \text{ кВт}$$

Ближайшая стандартная мощность двигателя — 7,5 кВт.

Однако двигатель мощностью 7,5 кВт выбирают только после проверки скорости, момента, нагрева и режима работы.

4. Расчет для поступательного движения

Для конвейеров, тележек, подъемников и других механизмов, перемещающих рабочий орган прямолинейно, используют формулу:

$$P_{\text{раб}} = F \cdot v$$

Мощность двигателя определяется так:

$$P_{\text{дв}} = F \cdot v / \eta_{\text{п}}$$

С учетом коэффициента запаса:

$$P_{\text{выб}} = k_z \cdot F \cdot v / \eta_{\text{п}}$$

где:

F — сила сопротивления движению, Н;

v — скорость движения, м/с;

$\eta_{\text{п}}$ — КПД передачи.

Пример расчета мощности конвейера

Тяговое усилие конвейера равно 1800 Н. Скорость ленты равна 0,8 м/с. КПД передачи равен 0,85.

Сначала определяем полезную мощность:

$$P_{\text{раб}} = F \cdot v$$

$$P_{\text{раб}} = 1800 \cdot 0,8$$

$$P_{\text{раб}} = 1440 \text{ Вт}$$

Затем определяем мощность на валу двигателя:

$$P_{\text{дв}} = 1440 / 0,85$$

$$P_{\text{дв}} = 1694 \text{ Вт}$$

Или:

$$P_{\text{дв}} = 1,694 \text{ кВт}$$

Если принять коэффициент запаса 1,2:

$$P_{\text{выб}} = 1,2 \cdot 1,694$$

$$P_{\text{выб}} = 2,03 \text{ кВт}$$

Выбирают ближайший стандартный двигатель мощностью 2,2 кВт.

Если конвейер запускается с полной загрузкой, дополнительно проверяют пусковой момент. В некоторых случаях вместо двигателя 2,2 кВт требуется двигатель 3 кВт или применение преобразователя частоты.

5. Расчет подъемных механизмов

К подъемным механизмам относятся электрические тали, краны, лебедки, лифты и подъемники.

Сила, необходимая для подъема груза, определяется его весом:

$$G = m \cdot g$$

где:

G — вес груза, Н;

m — масса груза, кг;

g — ускорение свободного падения, $9,81 \text{ м/с}^2$.

Если поднимаются груз, захват и тара, суммарная сила равна:

$$G_{\text{общ}} = G_{\text{груза}} + G_{\text{захвата}} + G_{\text{тары}}$$

Мощность двигателя подъемного механизма определяется формулой:

$$P_{\text{дв}} = G_{\text{общ}} \cdot v / \eta$$

где:

v — скорость подъема, м/с;

η — КПД подъемного механизма.

Пример расчета двигателя тали

Масса груза равна 800 кг. Масса крюка и захвата равна 100 кг. Скорость подъема составляет 0,15 м/с. КПД механизма равен 0,8.

Суммарная масса:

$$m_{\text{общ}} = 800 + 100$$

$$m_{\text{общ}} = 900 \text{ кг}$$

Суммарный вес:

$$G_{\text{общ}} = 900 \cdot 9,81$$

$$G_{\text{общ}} = 8829 \text{ Н}$$

Полезная мощность:

$$P_{\text{раб}} = 8829 \cdot 0,15$$

$$P_{\text{раб}} = 1324,35 \text{ Вт}$$

Мощность двигателя:

$$P_{\text{дв}} = 1324,35 / 0,8$$

$$P_{\text{дв}} = 1655 \text{ Вт}$$

$$P_{\text{дв}} = 1,655 \text{ кВт}$$

С учетом коэффициента запаса 1,2:

$$P_{\text{выб}} = 1,2 \cdot 1,655$$

$$P_{\text{выб}} = 1,986 \text{ кВт}$$

Можно выбрать двигатель мощностью 2,2 кВт.

Но окончательный выбор необходимо выполнить после проверки пускового момента, тормозного момента и продолжительности включения.

6. Расчет через вращающий момент

Если известен момент сопротивления рабочего механизма, используют формулу:

$$P = M \cdot n / 9550$$

Если момент задан на выходном валу редуктора, момент двигателя определяется так:

$$M_{\text{дв}} = M_{\text{раб}} / (i \cdot \eta_{\text{ред}})$$

где:

$M_{\text{дв}}$ — момент двигателя, Н·м;

$M_{\text{раб}}$ — момент рабочего механизма, Н·м;

i — передаточное отношение редуктора;

$\eta_{\text{ред}}$ — КПД редуктора.

Частота вращения двигателя:

$$n_{\text{дв}} = i \cdot n_{\text{раб}}$$

Пример

Рабочий механизм должен развивать момент 250 Н·м при частоте вращения 240 об/мин. Передаточное отношение редуктора равно 6. КПД редуктора равен 0,93.

Частота вращения двигателя:

$$n_{дв} = 6 \cdot 240$$

$$n_{дв} = 1440 \text{ об/мин}$$

Момент двигателя:

$$M_{дв} = 250 / (6 \cdot 0,93)$$

$$M_{дв} = 44,8 \text{ Н·м}$$

Мощность двигателя:

$$P_{дв} = 44,8 \cdot 1440 / 9550$$

$$P_{дв} = 6,75 \text{ кВт}$$

С учетом запаса выбирают двигатель мощностью 7,5 кВт и частотой вращения около 1500 об/мин.

7. Учет динамической нагрузки

При разгоне двигатель должен преодолевать не только момент сопротивления, но и инерцию вращающихся и перемещающихся частей.

Основное уравнение движения электропривода:

$$M_{дв} - M_{сопр} = J \cdot d\omega / dt$$

где:

$M_{дв}$ — момент двигателя;

$M_{сопр}$ — момент сопротивления;

J — приведенный момент инерции;

$d\omega / dt$ — угловое ускорение.

Отсюда момент двигателя при разгоне:

$$M_{\text{дв}} = M_{\text{сопр}} + M_{\text{дин}}$$

Динамический момент определяется формулой:

$$M_{\text{дин}} = J \cdot \varepsilon$$

где:

ε — угловое ускорение, рад/с².

Угловое ускорение:

$$\varepsilon = \omega / t_{\text{разг}}$$

где:

$t_{\text{разг}}$ — время разгона, с.

Пример

Момент инерции механизма, приведенный к валу двигателя, равен 2 кг·м². Двигатель должен разогнаться до 1500 об/мин за 2 секунды. Статический момент сопротивления равен 20 Н·м.

Сначала переводим частоту вращения в угловую скорость:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot n / 60$$

$$\omega = 2 \cdot 3,1416 \cdot 1500 / 60$$

$$\omega = 157,1 \text{ рад/с}$$

Угловое ускорение:

$$\varepsilon = 157,1 / 2$$

$$\varepsilon = 78,55 \text{ рад/с}^2$$

Динамический момент:

$$M_{\text{дин}} = 2 \cdot 78,55$$

$$M_{\text{дин}} = 157,1 \text{ Н·м}$$

Пусковой момент:

$$M_{\text{пуск}} = M_{\text{сопр}} + M_{\text{дин}}$$

$$M_{\text{пуск}} = 20 + 157,1$$

$$M_{\text{пуск}} = 177,1 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Следовательно, двигатель должен иметь пусковой момент не менее 177,1 Н·м.

Если выбрать двигатель только по рабочей мощности и не проверить разгон, двигатель может не запуститься или будет разгоняться слишком долго.

8. Приведение нагрузки к валу двигателя

Если между двигателем и механизмом есть редуктор, нагрузку приводят к валу двигателя.

Приведенный момент сопротивления:

$$M_{\text{пр}} = M_{\text{наг}} / (i \cdot \eta)$$

Приведенный момент инерции:

$$J_{\text{пр}} = J_{\text{наг}} / i^2$$

где:

i — передаточное отношение;

η — КПД передачи.

Если передаточное отношение равно 5, момент инерции механизма при приведении к валу двигателя уменьшается в 25 раз:

$$J_{\text{пр}} = J_{\text{наг}} / 5^2$$

$$J_{\text{пр}} = J_{\text{наг}} / 25$$

Суммарный момент инерции:

$$J_{\text{общ}} = J_{\text{дв}} + J_{\text{ред}} + J_{\text{мех}} / i^2$$

Для поступательно движущейся массы приведенный момент инерции определяют через связь между линейной и угловой скоростью:

$$v = k \cdot \omega$$

$$J_{пр} = m \cdot k^2$$

Это позволяет рассчитывать электроприводы станков, подъемников, лебедок и винтовых механизмов.

9. Выбор мощности двигателя для станка

В металлорежущих станках обычно имеются главный привод, приводы подач и вспомогательные приводы.

Главный привод вращает шпиндель или рабочий орган. Привод подачи перемещает суппорт, стол или инструмент. Вспомогательные приводы обеспечивают работу насоса охлаждающей жидкости, системы смазки, стружкоудаления и других устройств.

Мощность главного привода определяется мощностью резания:

$$P_{рез} = F_{рез} \cdot v_{рез}$$

Если сила резания выражена в ньютонах, а скорость резания — в метрах в секунду, мощность получается в ваттах.

В киловаттах:

$$P_{рез} = F_{рез} \cdot v_{рез} / 1000$$

Мощность двигателя:

$$P_{дв} = P_{рез} / \eta_{мех}$$

С учетом коэффициента запаса:

$$P_{выб} = k_z \cdot P_{рез} / \eta_{мех}$$

Скорость резания на токарном станке

Скорость резания определяется формулой:

$$v_{рез} = \pi \cdot D \cdot n / 60$$

где:

D — диаметр детали, м;

n — частота вращения шпинделя, об/мин.

Если диаметр задан в миллиметрах, а скорость требуется получить в метрах в минуту:

$$v_{\text{рез}} = \pi \cdot D \cdot n / 1000$$

Момент на шпинделе:

$$M_{\text{шп}} = 9550 \cdot P_{\text{шп}} / n_{\text{шп}}$$

При выборе двигателя токарного станка проверяют работу на минимальной и максимальной скорости, пуск, торможение, реверс, изменение глубины резания и кратковременную перегрузку.

Для главного привода станка желательно иметь жесткую механическую характеристику. При увеличении силы резания скорость вращения не должна резко снижаться. В материалах по электроприводу станков указывается, что изменение скорости главного привода при изменении нагрузки обычно стремятся ограничить величиной 5–10%.

10. Выбор мощности привода подачи

Мощность привода подачи определяется усилием подачи и скоростью перемещения:

$$P_{\text{подачи}} = F_{\text{подачи}} \cdot v_{\text{подачи}} / \eta_{\text{подачи}}$$

Если используется винтовая передача, момент на винте:

$$M_{\text{винта}} = F_{\text{подачи}} \cdot p / (2 \cdot \pi \cdot \eta_{\text{винта}})$$

где:

p — шаг винта, м;

$\eta_{\text{винта}}$ — КПД винтовой передачи.

После определения момента винта мощность двигателя рассчитывают так:

$$P_{\text{дв}} = M_{\text{винта}} \cdot n_{\text{винта}} / 9550$$

Для привода подачи важен момент на низкой скорости. Поэтому двигатель малой мощности может потребовать преобразователь частоты, сервопривод или специальную систему регулирования.

Для современных станков подачи должны иметь высокий диапазон регулирования скорости. В материалах по станкам отмечается, что диапазон регулирования приводов подачи может достигать 1000:1, а механическая характеристика должна быть жесткой.

11. Расчет двигателя для насоса

Для насоса основными параметрами являются подача, напор, плотность жидкости и КПД.

Гидравлическая мощность:

$$P_{\text{гид}} = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H$$

Мощность двигателя:

$$P_{\text{дв}} = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H / (\eta_{\text{нас}} \cdot \eta_{\text{перед}})$$

С учетом запаса:

$$P_{\text{выб}} = k_z \cdot \rho \cdot g \cdot Q \cdot H / (\eta_{\text{нас}} \cdot \eta_{\text{перед}})$$

где:

ρ — плотность жидкости, кг/м³;

g — ускорение свободного падения, 9,81 м/с²;

Q — подача, м³/с;

H — напор, м;

$\eta_{\text{нас}}$ — КПД насоса;

$\eta_{\text{перед}}$ — КПД передачи.

Пример

Подача насоса равна 0,02 м³/с. Напор составляет 25 м. КПД установки равен 0,8.

$$P_{\text{дв}} = 1000 \cdot 9,81 \cdot 0,02 \cdot 25 / 0,8$$

$$P_{\text{дв}} = 6131 \text{ Вт}$$

$$P_{\text{дв}} = 6,13 \text{ кВт}$$

С учетом запаса выбирают двигатель мощностью 7,5 кВт.

При выборе насоса необходимо проверять не только мощность двигателя, но и рабочую точку насоса. Она определяется пересечением характеристики насоса и характеристики трубопроводной сети.

Для центробежного насоса действуют зависимости:

Q пропорционально n

H пропорционально n^2

P пропорционально n^3

То есть при уменьшении частоты вращения мощность снижается особенно быстро. Поэтому частотное регулирование насоса обычно экономичнее дросселирования.

12. Расчет двигателя вентилятора

Мощность вентилятора определяется формулой:

$$P_{\text{дв}} = Q \cdot \Delta p / \eta$$

где:

Q — расход воздуха, $\text{м}^3/\text{с}$;

Δp — давление вентилятора, Па ;

η — общий КПД вентиляционной установки.

Пример

Расход воздуха равен $1,5 \text{ м}^3/\text{с}$. Давление равно 600 Па . КПД составляет $0,65$.

$$P_{\text{дв}} = 1,5 \cdot 600 / 0,65$$

$$P_{\text{дв}} = 1384,6 \text{ Вт}$$

$$P_{\text{дв}} = 1,38 \text{ кВт}$$

С учетом запаса можно выбрать двигатель мощностью $1,5$ или $2,2 \text{ кВт}$.

При частотном регулировании вентилятора необходимо учитывать допустимую минимальную скорость, охлаждение двигателя и максимальную окружную скорость рабочего колеса.

13. Расчет двигателя компрессора

Для компрессора точный расчет мощности зависит от производительности, давления всасывания, давления нагнетания, температуры газа, количества ступеней и КПД.

В общем виде:

$$P_{\text{дв}} = P_{\text{сжатия}} / (\eta_{\text{компр}} \cdot \eta_{\text{перед}})$$

где:

$P_{\text{сжатия}}$ — мощность, необходимая для сжатия газа;

$\eta_{\text{компр}}$ — КПД компрессора;

$\eta_{\text{перед}}$ — КПД передачи.

При практическом выборе часто используют паспортную мощность компрессорного блока.

Особенно важно проверить пусковой режим:

$$M_{\text{пуск двигателя}} > M_{\text{сопр.пуск компрессора}}$$

Компрессор должен запускаться при минимальном давлении в нагнетательной линии. Для этого используется клапан разгрузки. Реле давления отключает компрессор при достижении верхнего давления и включает его после снижения давления до нижнего значения.

14. Расчет двигателя конвейера

Для конвейера сначала определяют суммарное тяговое усилие:

$$F_{\text{общ}} = F_{\text{ленты}} + F_{\text{груза}} + F_{\text{роликов}} + F_{\text{подъема}} + F_{\text{техн}}$$

Мощность двигателя:

$$P_{\text{дв}} = F_{\text{общ}} \cdot v / \eta_{\text{пр}}$$

Если конвейер наклонный, учитывают силу подъема:

$$F_{\text{подъема}} = m \cdot g \cdot \sin \alpha$$

где:

m — масса груза;

α — угол наклона конвейера.

При горизонтальном движении основными являются сопротивление ленты, роликов, подшипников и приводного барабана.

При выборе двигателя конвейера обязательно проверяют пуск с полной загрузкой. Для длинных конвейеров применяют плавный пуск или преобразователь частоты. Если несколько конвейеров работают последовательно, сначала включают конвейер, расположенный ближе к месту разгрузки, а затем подающий конвейер.

15. Расчет двигателя шлифовального станка

Для шлифовального круга сначала определяют допустимую частоту вращения:

$$n = 60 \cdot v / (\pi \cdot D)$$

где:

v — допустимая окружная скорость круга, м/с;

D — диаметр круга, м.

Если диаметр круга равен 0,4 м, а окружная скорость равна 30 м/с:

$$n = 60 \cdot 30 / (3,1416 \cdot 0,4)$$

$$n = 1432 \text{ об/мин}$$

Эта скорость не должна быть превышена. Превышение окружной скорости может привести к разрушению шлифовального круга.

Мощность двигателя:

$$P_{\text{дв}} = M \cdot n / 9550$$

При выборе двигателя дополнительно проверяют разгон круга, устойчивость скорости, работу при правке круга, охлаждении и возможных кратковременных перегрузках.

16. Расчет мощности лифта

Для лифта сначала определяют массу кабины, номинальный груз и противовес.

Вес противовеса:

$$G_{\text{пр}} = G_{\text{кабины}} + \alpha \cdot G_{\text{груза}}$$

Коэффициент уравнивания α обычно принимают равным 0,4–0,5.

Неуравновешенная сила:

$$F = G_{\text{кабины}} + G_{\text{груза}} - G_{\text{пр}}$$

Полезная мощность:

$$P_{\text{пол}} = F \cdot v$$

Мощность двигателя:

$$P_{\text{дв}} = F \cdot v / \eta$$

При окончательном расчете учитывают массу канатов, сопротивление направляющих, КПД редуктора, ускорение кабины и динамическую нагрузку.

Для лифта мощность двигателя должна быть согласована с тормозом. Тормоз должен удерживать кабину при отключении питания. В лифтовых системах также используются концевые выключатели, контакты дверей, ловители и ограничитель скорости.

17. Длительный и повторно-кратковременный режимы

Режим работы двигателя обозначает характер изменения нагрузки и нагрева во времени.

В продолжительном режиме двигатель работает длительно, и его температура успевает достигнуть установившегося значения. Такой режим характерен для насосов, вентиляторов и некоторых компрессоров.

В кратковременном режиме двигатель работает ограниченное время, а затем остывает. Такой режим встречается в отдельных приводах заслонок, механизмов настройки и вспомогательных устройств.

В повторно-кратковременном режиме периоды работы чередуются с паузами. Этот режим характерен для кранов, талей, лифтов, прессов и станков.

Продолжительность включения:

$$ПВ = t_{\text{работы}} / (t_{\text{работы}} + t_{\text{паузы}}) \cdot 100\%$$

Пример

Двигатель работает 6 минут и находится в паузе 4 минуты:

$$ПВ = 6 / (6 + 4) \cdot 100\%$$

$$ПВ = 60\%$$

Если двигатель рассчитан на ПВ 40%, а фактическая ПВ равна 60%, его необходимо проверить по нагреву или выбрать двигатель большей мощности.

Для ориентировочного пересчета:

$$P2 = P1 \cdot \sqrt{(ПВ2 / ПВ1)}$$

Например:

$$P1 = 5,5 \text{ кВт}$$

$$ПВ1 = 40\%$$

$$ПВ2 = 60\%$$

$$P2 = 5,5 \cdot \sqrt{(60 / 40)}$$

$$P2 = 6,74 \text{ кВт}$$

В этом случае выбирают двигатель ближайшей стандартной мощности 7,5 кВт.

18. Нагрузочная диаграмма

Нагрузочная диаграмма показывает изменение мощности или момента во времени.

Для каждого интервала определяют мощность и продолжительность:

$P1, t1;$

$P2, t2;$

$P3, t3.$

Эквивалентная мощность:

$$P_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{((P1^2 \cdot t1 + P2^2 \cdot t2 + P3^2 \cdot t3) / (t1 + t2 + t3))}$$

Пример

Двигатель работает 20 секунд при мощности 8 кВт, 30 секунд при мощности 5 кВт и 50 секунд находится в паузе.

$$P_{\text{экв}} = \sqrt{((8^2 \cdot 20 + 5^2 \cdot 30 + 0^2 \cdot 50) / (20 + 30 + 50))}$$

$$P_{\text{экв}} = \sqrt{((1280 + 750) / 100)}$$

$$P_{\text{экв}} = \sqrt{20,3}$$

$$P_{\text{экв}} = 4,51 \text{ кВт}$$

По нагреву двигатель должен иметь мощность не менее 4,51 кВт. Но он также должен выдерживать максимальную нагрузку 8 кВт. Поэтому окончательный выбор может быть выполнен в пользу двигателя 5,5 или 7,5 кВт.

Эквивалентный момент:

$$M_{\text{экв}} = \sqrt{((M_1^2 \cdot t_1 + M_2^2 \cdot t_2 + \dots + M_n^2 \cdot t_n) / (t_1 + t_2 + \dots + t_n))}$$

Эквивалентный ток:

$$I_{\text{экв}} = \sqrt{((I_1^2 \cdot t_1 + I_2^2 \cdot t_2 + \dots + I_n^2 \cdot t_n) / (t_1 + t_2 + \dots + t_n))}$$

19. Проверка по нагреву

Нагрев двигателя связан с потерями энергии. Потери в обмотках примерно пропорциональны квадрату тока:

$$P_{\text{потерь}} = I^2 \cdot R$$

Если ток увеличивается в два раза, потери в меди увеличиваются в четыре раза.

Для продолжительного режима проверяют:

$$P_{\text{ном двигателя}} \geq P_{\text{расчетная}}$$

Для переменной нагрузки используют эквивалентное значение:

$$P_{\text{ном двигателя}} \geq P_{\text{экв}}$$

Если двигатель работает от преобразователя частоты на низкой скорости, необходимо учитывать уменьшение охлаждения. Обычный вентилятор на валу двигателя при снижении скорости вращается медленнее и подает меньше воздуха. Поэтому при длительной работе на низкой частоте может потребоваться независимый вентилятор охлаждения.

20. Проверка по перегрузке

Номинальной мощности может хватать для установившегося режима, но двигатель может остановиться при кратковременной перегрузке.

Проверяют:

$$M_{\text{макс двигателя}} \geq M_{\text{макс нагрузки}}$$

Для пуска:

$$M_{\text{пуск двигателя}} \geq M_{\text{сопр.пуск}}$$

Для механизмов с ударной нагрузкой нужен дополнительный запас по максимальному моменту.

К таким механизмам относятся прессы, дробилки, загруженные конвейеры, подъемники, компрессоры и станки при глубоком резании.

21. Пусковой ток

Пусковой ток асинхронного двигателя определяется формулой:

$$I_{\text{пуск}} = k_{\text{п}} \cdot I_{\text{ном}}$$

Если номинальный ток равен 25 А, а кратность пускового тока равна 6:

$$I_{\text{пуск}} = 6 \cdot 25$$

$$I_{\text{пуск}} = 150 \text{ А}$$

Большой пусковой ток может привести к падению напряжения и отключению защиты. Поэтому проверяют:

- мощность питающего трансформатора;
- сечение кабеля;
- длину линии;
- допустимое падение напряжения;
- уставки автоматического выключателя;
- способ запуска двигателя.

Для снижения пускового тока используют пуск «звезда–треугольник», плавный пуск или преобразователь частоты. Но при этом необходимо учитывать, что уменьшение пускового тока может сопровождаться уменьшением пускового момента.

22. Номинальный ток трехфазного двигателя

Номинальный ток трехфазного двигателя:

$$I_{\text{ном}} = P_{\text{ном}} / (\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos\varphi \cdot \eta)$$

В Word формулу можно записать в таком виде:

$$I_{\text{ном}} = P_{\text{ном}} / (1,732 \cdot U \cdot \cos\varphi \cdot \eta)$$

где:

$P_{\text{ном}}$ — мощность двигателя, Вт;

U — линейное напряжение, В;

$\cos\varphi$ — коэффициент мощности;

η — КПД двигателя.

Пример

$$P_{\text{ном}} = 7,5 \text{ кВт} = 7500 \text{ Вт};$$

$$U = 380 \text{ В};$$

$$\cos\varphi = 0,8;$$

$$\eta = 0,9.$$

$$I_{\text{ном}} = 7500 / (1,732 \cdot 380 \cdot 0,8 \cdot 0,9)$$

$$I_{\text{ном}} = 15,8 \text{ А}$$

23. Частотно-регулируемый электропривод

При изменении частоты питания изменяется скорость вращения асинхронного двигателя.

Приближенно:

$$f_2 = f_1 \cdot n_2 / n_1$$

Если при частоте 50 Гц двигатель вращается со скоростью 1450 об/мин, а требуется скорость 1000 об/мин:

$$f_2 = 50 \cdot 1000 / 1450$$

$$f_2 = 34,5 \text{ Гц}$$

До номинальной частоты обычно поддерживается примерно постоянное отношение напряжения к частоте:

$$U_1 / f_1 = U_2 / f_2$$

Отсюда:

$$U_2 = U_1 \cdot f_2 / f_1$$

$$U_2 = 380 \cdot 34,5 / 50$$

$$U_2 = 262,2 \text{ В}$$

На практике частоту и напряжение уточняют с учетом скольжения, настройки преобразователя и требуемого момента.

24. Как выбрать двигатель по каталогу

После выполнения расчетов получают расчетную мощность, момент и скорость. Затем выбирают ближайший стандартный двигатель.

Например:

$$P_{\text{расч}} = 6,13 \text{ кВт};$$

$$P_{\text{с запасом}} = 7,0 \text{ кВт.}$$

Ближайшая стандартная мощность:

$$P_{\text{ном}} = 7,5 \text{ кВт.}$$

Но необходимо проверить, чтобы:

$$P_{\text{ном}} \geq P_{\text{расч}};$$

$$M_{\text{ном}} \geq M_{\text{раб}};$$

$$M_{\text{пуск}} \geq M_{\text{сопр.пуск}};$$

$M_{\max} \geq M_{\max.нагрузки}$.

Также проверяют:

- номинальное напряжение;
- частоту сети;
- частоту вращения;
- режим работы;
- способ монтажа;
- степень защиты;
- класс изоляции;
- охлаждение;
- условия окружающей среды;
- возможность работы от преобразователя частоты;
- наличие тормоза;
- количество допустимых пусков в час.

25. Основные ошибки при выборе мощности

Нельзя выбирать двигатель только по формуле $P = F \cdot v$, если между двигателем и рабочим органом есть передача. Необходимо учитывать КПД передачи.

Нельзя выбирать двигатель только по рабочей мощности, если механизм имеет тяжелый пуск. Нужно проверить пусковой момент.

Нельзя использовать среднее арифметическое значение мощности вместо эквивалентной мощности. При нагреве используется квадрат зависимости:

$$P_{\text{экв}} = \sqrt{(\sum(P_i^2 \cdot t_i) / \sum t_i)}$$

Нельзя забывать о массе захвата, крюка, тары, кабины и других подвижных частей.

Нельзя устанавливать двигатель продолжительного режима на механизм с частыми пусками без проверки ПВ.

Нельзя длительно эксплуатировать стандартный двигатель на очень низкой частоте с номинальным моментом без проверки охлаждения.

Нельзя выбирать насос или вентилятор только по максимальной производительности. Нужно учитывать характеристику сети и рабочую точку.

Нельзя применять чрезмерный запас мощности без необходимости. Слишком мощный двигатель дороже, имеет большие габариты и может работать с ухудшенным коэффициентом мощности.

Заключение

Расчет мощности электродвигателя выполняют в несколько этапов.

Сначала определяют силу, момент, скорость, производительность или напор механизма.

Затем рассчитывают полезную мощность:

$$P_{\text{раб}} = F \cdot v$$

или:

$$P_{\text{раб}} = M \cdot n / 9550$$

Для насоса:

$$P_{\text{раб}} = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H$$

Для вентилятора:

$$P_{\text{раб}} = Q \cdot \Delta p$$

После этого учитывают КПД:

$$P_{\text{дв}} = P_{\text{раб}} / \eta$$

Затем вводят коэффициент запаса:

$$P_{\text{выб}} = k_z \cdot P_{\text{дв}}$$

После выбора ближайшей стандартной мощности двигатель проверяют по скорости, моменту, нагреву, пуску, торможению, продолжительности включения, пусковому току и условиям эксплуатации.

Формулы в данном варианте записаны в линейном виде, например:

$$P = F \cdot v$$

$$M = 9550 \cdot P / n$$

$$P_{\text{дв}} = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H / \eta$$

$$\text{ПВ} = t_{\text{работы}} / (t_{\text{работы}} + t_{\text{паузы}}) \cdot 100\%$$

Повный А. В., Гомельский государственный политехнический колледж

Сайт: <https://electricalschool.info/>

Какал в ТГ: <https://t.me/electricalschool>

Электронные учебные пособия: <https://electricalschool.info/e-textbooks.html>