

Часть 1. Редукторы и мотор-редукторы

Выбор мотор-редуктора

От правильности выбора мотор-редуктора во многом зависит не только его долговечность, но и надежность всего привода. Сложившаяся в России практика выбора мотор-редукторов несколько отличается от зарубежной.

Зарубежная методика выбора мотор-редуктора

При выборе мотор-редуктора по зарубежной методике, мы неизбежно сталкиваемся с так называемым коэффициентом эксплуатации, или сервис-фактором ($F.S.$), который учитывает режим эксплуатации мотор-редуктора. Значения сервис-фактора получены эмпирическим путем на основе опыта эксплуатации и систематизации данных. $F.S.$ – учитывает режим работы как электродвигателя, так и редуктора, и, таким образом, является комплексным показателем, характеризующим работу мотор-редуктора, как единой системы.

Для определения режима работы по $F.S.$ необходимо знать:

- характер нагрузки;
- продолжительность работы привода в сутки;
- число включений в час.

Продолжительность работы в сутки и число включений в час назначаются проектировщиком машины, исходя из технологического процесса или технического задания на проектирование.

Характер нагрузки определяется по соотношению моментов инерции ротора электродвигателя I_p , [$кг \cdot м^2$] и момента инерции нагрузки, приведенного к ротору электродвигателя I_{np} , [$кг \cdot м^2$]. Приведенный момент инерции нагрузки равен:

$$I_{np} = \frac{I_{нагр}}{i^2}, \text{ где: } i \text{ – передаточное отношение редуктора; } I_{нагр}, [кг \cdot м^2] \\ \text{ – момент инерции нагрузки на выходном валу редуктора.}$$

Нагрузки условно делятся на три группы:

- **«А»** – спокойная безударная, момент инерции ротора двигателя больше момента инерции нагрузки, приведенного к быстроходному валу: $I_p > I_{np}$ (это условие почти всегда выполняется, если передаточное отношение редуктора достаточно велико). К данному типу нагрузки можно отнести следующие механизмы:

Мешалки для чистых жидкостей, загрузочные устройства для печей, тарельчатые питатели, генераторы, центробежные насосы, транспортеры с равномерно распределенной нагрузкой, шнековые или ленточные транспортеры для легких сыпучих материалов, вентиляторы, сборочные конвейеры, небольшие мешалки, подъемники малой грузоподъемности, подъемные платформы, очистительные машины, фасовочные машины, контрольные машины.

- **«В»** – нагрузка с умеренными ударами, момент инерции нагрузки, приведенный к быстроходному валу не более чем в три раза превышает момент инерции ротора двигателя: $I_{np}/I_p \leq 3$. К данному типу нагрузки относятся:

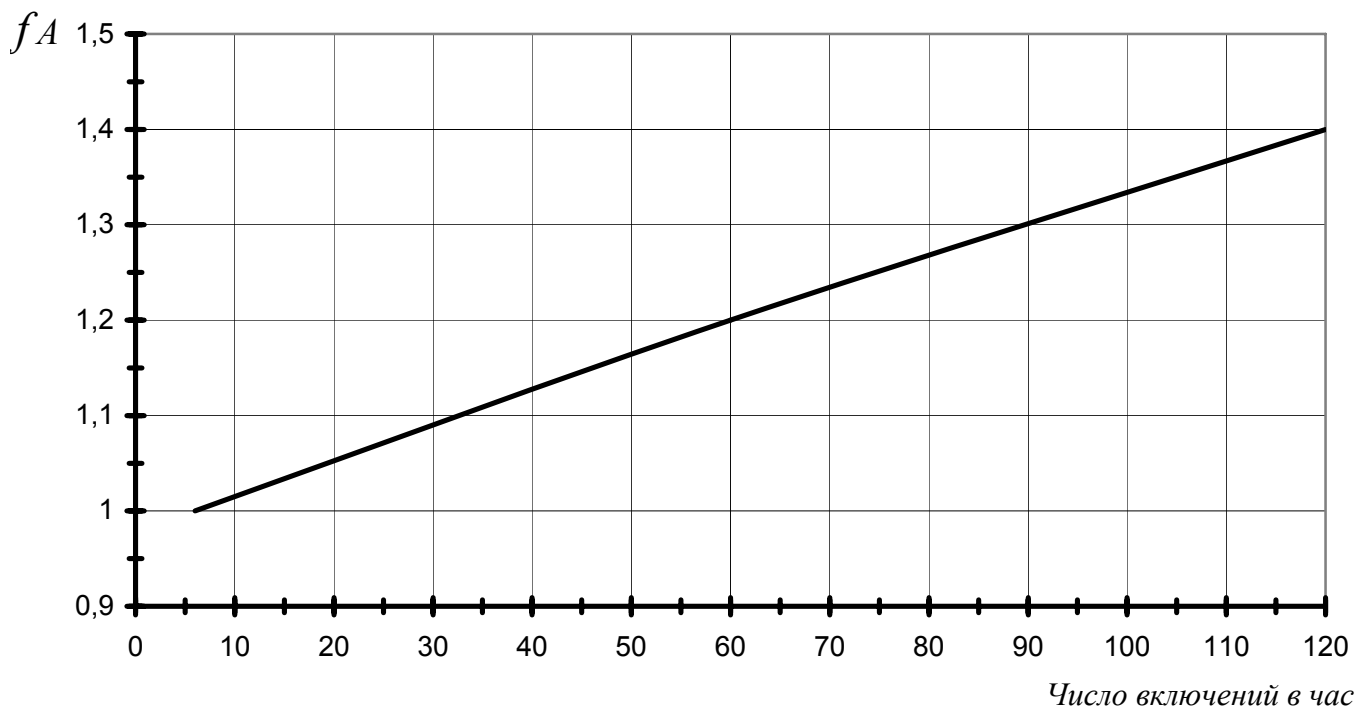
Мешалки для вязких жидкостей и твердых материалов, ленточные транспортеры, средние лебедки, канализационные шнеки, волоконные установки, вакуумные фильтры, ковшовые элеваторы, краны, устройства подачи в деревообрабатывающих станках, подъемники, балансировочные машины, резьбонарезные станки, ленточные транспортеры для тяжелых материалов, домкраты, раздвижные двери, скребковые конвейеры, упаковочные машины, бетономешалки, фрезерные станки, гибочные станки, шестеренные насосы, штабелеукладчики, поворотные столы.

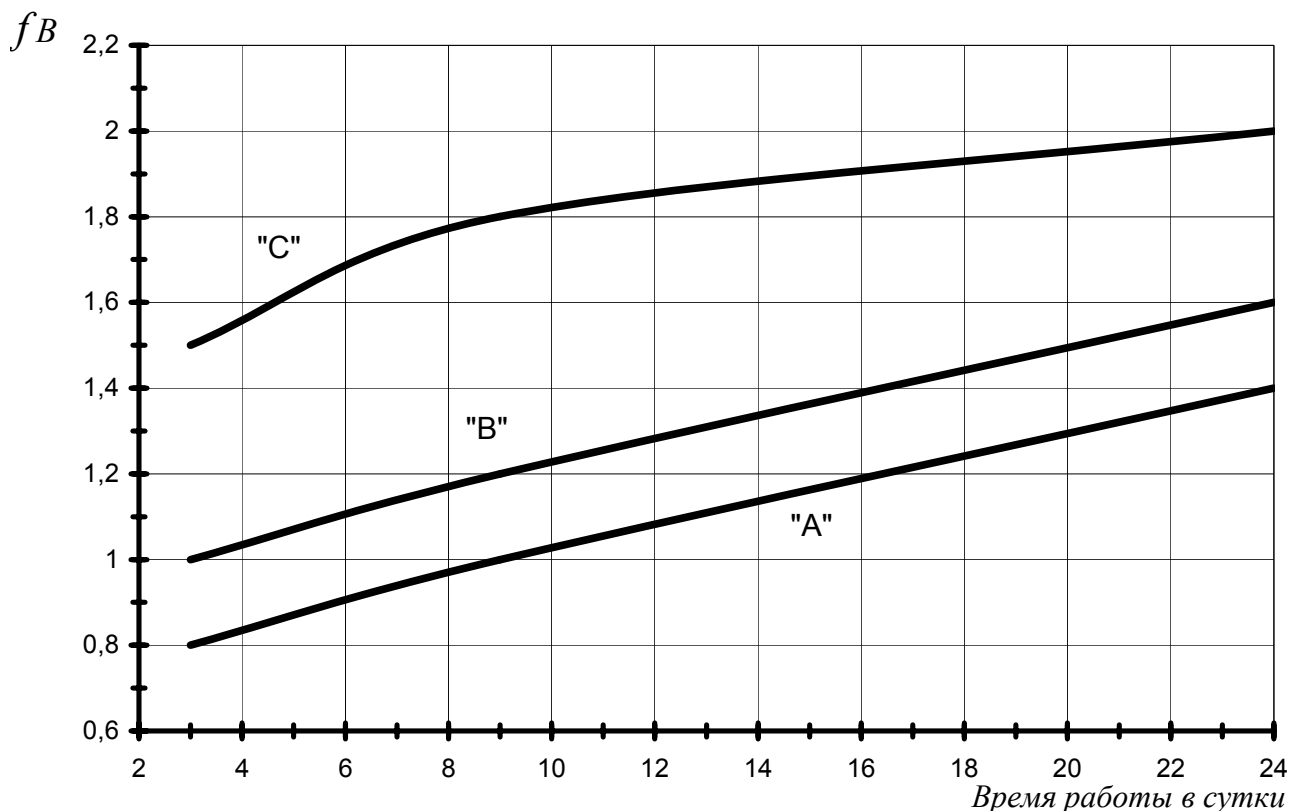
- «С» – нагрузка с сильными ударами – приведённый момент инерции более чем в три раза превышает момент инерции ротора электродвигателя: $I_{np}/I_p > 3$. Характер нагрузки сказывается, прежде всего, в период пуска/останова привода, поэтому в последнем случае «С», мы рекомендуем использовать устройство плавного пуска для снижения ударных нагрузок на передачу и, как следствие, повышения надёжности и долговечности привода в целом. К данному типу нагрузки относятся: Лебедки и подъемники для тяжелых грузов, экструдеры, резиновые каландры, прессы для кирпича, строгальные станки, шаровые мельницы, мешалки для тяжелых материалов, ножницы, прессы, центрифуги, шлифовальные станки, камнедробилки, цепные черпаковые подъемники, сверлильные станки, эксцентриковые прессы, гибочные станки, поворотные столы, барабаны, вибраторы, токарные станки, прокатные станы, мельницы для цемента.

Значения коэффициента эксплуатации варьируются для мотор-редукторов разных производителей, но эти вариации незначительны. Обычно коэффициент эксплуатации определяется, как произведение двух коэффициентов:

$$F.S. = f_B \cdot f_A, \text{ где: } f_B - \text{коэффициент, зависящий от характера нагрузки и продолжительности работы привода в сутки,}$$
$$f_A - \text{коэффициент, зависящий от числа включений в час.}$$

Коэффициенты f_A и f_B определяются по следующим графикам:





Значение коэффициента эксплуатации $F.S.$ также можно определить, пользуясь таблицей:

Характер нагрузки и время работы в сутки Число включений в час	«А» Равномерный режим работы $I_p > I_{np}$			«В» Режим работы с умеренными ударами $I_{np}/I_p \leq 3$			«С» Режим работы с сильными ударами $I_{np}/I_p > 3$		
	3...4	8...10	10...24	3...4	8...10	10...24	3...4	8...10	10...24
6	0,8	1,0	1,4	1,0	1,2	1,6	1,5	1,8	2,0
60	1,0	1,2	1,7	1,2	1,4	1,9	1,8	2,2	2,4
120	1,1	1,4	2,0	1,4	1,7	2,2	2,1	2,5	2,8



ВНИМАНИЕ! Выбирать следует мотор-редуктор с ближайшим большим коэффициентом эксплуатации $F.S.$, чем расчетный.

В таблицах выбора мотор-редукторов Вы, зная необходимую мощность привода P_1 [кВт], скорость выходного вала n_2 [об/мин], а также требуемое значение коэффициента эксплуатации FS , осуществите подбор конкретной позиции мотор-редуктора.

В таблице выбора для этой позиции будут указаны следующие данные:

- Мощность двигателя P_1 [кВт] и его тип
- Скорость выходного вала n_2 [об/мин]
- Крутящий момент на выходном валу T_2 [Н·м]
- Коэффициент эксплуатации FS

Пример:

Подобрать мотор-редуктор для конвейера, имеющего следующие параметры:

- Работа в течение двух смен (16 часов), равномерный режим работы «А»
- 60 включений в час;
- Потребная мощность привода: $P_1=0,75$ кВт
- Требуемая скорость выходного вала: $n_2=37$ об/мин

Последовательность выбора:

1. Назначается требуемый коэффициент эксплуатации. По графикам для коэффициентов f_A и f_B находятся их значения:

$$60 \text{ включений в час} \Rightarrow f_A = 1,2$$

$$16 \text{ часов в сутки в безударном режиме} \Rightarrow f_B = 1,19$$

$$F.S. = f_B \cdot f_A = 1,19 \cdot 1,2 = 1,428 \approx 1,43$$

2. Предполагается выбор мотор-редуктора с четырехполюсным двигателем, у которого $n_1=1400$ об/мин

$$\text{Требуемое передаточное отношение редуктора } i_{mp} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{1400}{37} = 37,84$$

По ряду передаточных чисел одноступенчатых червячных редукторов 7Ч-М (7; 10; 15; 20; 28; 40; 49; 56; 70; 80; 100) выбирается редуктор с $i=40$

3. В таблице выбора мотор-редукторов находится блок позиций для $P_1=0,75$ кВт, а в ней столбец, соответствующий $i=40$.

Из трех доступных для выбора габаритов мотор-редукторов (7МЧ-М-60; 7МЧ-М-70; 7МЧ-М-85) выбирается тот, у которого значение коэффициента эксплуатации FS больше требуемого (1,43).

Этому условию удовлетворяет мотор-редуктор 7МЧ-М-70, имеющий следующие параметры: $n_2=37$ об/мин; $M_2=145,3$ Н·м; $FS=1,6 > 1,43$.

4. В том случае, если из доступных для выбора габаритов при данной мощности привода и данном передаточном отношении выбор произвести не удастся, рекомендуется:

- Выбрать другой тип мотор-редуктора (например, цилиндро-червячный или цилиндрический)
- Выбрать другой тип двигателя. Имеются двигатели с 2 ($n_1=3000$ об/мин); 4 ($n_1=1400$ об/мин); 6 ($n_1=900$ об/мин); 8 ($n_1=750$ об/мин) полюсами.
- Изменить условия выбора мотор-редуктора.

Обратите внимание на то, что в таблицах выбора мотор-редуктора приводятся параметры, при которых двигатель работает в номинальном режиме, без перегрузки.

Табличные параметры позиции рассчитываются производителем следующим образом (для справки):

Одноступенчатые червячные мотор-редукторы:

1. Крутящий момент на выходном валу двигателя:

$$T_1 = \frac{9550 \cdot P_1}{n_1} [H \cdot m], \text{ где: } P_1 [кВт] - \text{номинальная мощность двигателя;}$$

$$n_1 \left[\frac{\text{об}}{\text{мин}} \right] - \text{номинальная частота вращения его вала.}$$



$$n_1 = \frac{2 \cdot f \cdot 60}{p} \left[\frac{\text{об}}{\text{мин}} \right], \text{ где: } f [Гц] - \text{частота питающего напряжения сети;}$$

p – число полюсов электродвигателя.

2. Крутящий момент на выходном валу мотор-редуктора:

$$T_2 = T_1 \cdot i_p \cdot \eta [H \cdot M], \text{ где: } i_p - \text{номинальное передаточное отношение редуктора;}$$

$\eta = f(n_1)$ – динамический КПД редуктора.

3. Коэффициент эксплуатации:

$$F.S. = \frac{T_{\text{lim}}}{T_2}, \text{ где: } T_{\text{lim}} = f(n_1) [H \cdot M] - \text{предельный момент по изгибной прочности,}$$

передаваемый редуктором. Значение его указывается в технических параметрах.

Двухступенчатые цилиндрико-червячные мотор-редукторы:

1. Крутящий момент на выходном валу двигателя:

$$T_1 = \frac{9550 \cdot P_1}{n_1} [H \cdot M].$$

2. Крутящий момент на выходном валу цилиндрической предступени:

$$T_{cm} = T_1 \cdot i_{cm} \cdot \eta_{cm} [H \cdot M], \text{ где: } \eta_{cm} = 0,98 - \text{КПД цилиндрической предступени.}$$

3. Коэффициент эксплуатации предступени:

$$F.S._{cm} = \frac{T_{\text{lim}}^{cm}}{T_{cm}}.$$

4. Крутящий момент на выходном валу мотор-редуктора:

$$T_2 = T_{cm} \cdot i_p \cdot \eta_p [H \cdot M].$$

5. Коэффициент эксплуатации червячной ступени:

$$F.S._{\text{черв}} = \frac{T_{\text{lim}}^{\text{ред}}}{T_2}.$$

6. Коэффициент эксплуатации мотор-редуктора:

$$F.S. = \min \{ F.S._{cm}; F.S._{\text{черв}} \}.$$

Двухступенчатые червячные мотор-редукторы:

1. Крутящий момент на выходном валу двигателя:

$$T_1 = \frac{9550 \cdot P_1}{n_1} [H \cdot M].$$

2. Крутящий момент на выходном валу первой ступени:

$$T_{cm1} = T_1 \cdot i_{cm1} \cdot \eta_{cm1} [H \cdot M], \text{ где: } \eta_{cm1} = f(n_1) - \text{динамический КПД первой ступени.}$$

3. Коэффициент эксплуатации первой ступени:

$$F.S._{cm1} = \frac{T_{\text{lim}}^{cm1}}{T_{cm1}}.$$

4. Крутящий момент на выходном валу мотор-редуктора:

$$T_2 = T_{cm1} \cdot i_p \cdot \eta_p [H \cdot M].$$

5. Коэффициент эксплуатации второй червячной ступени:

$$F.S._{cm2} = \frac{T_{\text{lim}}^{cm2}}{T_{cm2}}.$$

6. Коэффициент эксплуатации мотор-редуктора:

$$F.S. = \min \{ F.S._{cm1}; F.S._{cm2} \}.$$

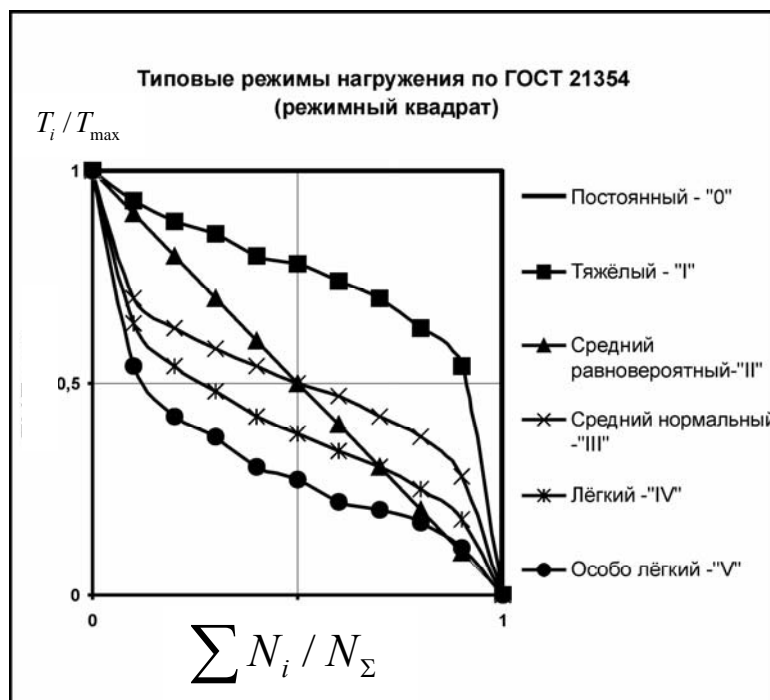
Цилиндрические мотор-редукторы рассчитываются аналогично одноступенчатым червячным.

Отечественная методика выбора мотор-редуктора (режимы эксплуатации)

Действующий в России стандарт на прочностной расчёт цилиндрических зубчатых передач – ГОСТ 21354 вводит понятие о типовых статистических режимах эксплуатации, которые наглядно могут быть представлены в координатах: относительный момент $\frac{T_i}{T_{\max}}$, где T_i – соответствующий момент в гистограмме нагрузок, T_{\max} – наибольший длительно действующий момент, и относительное число циклов $\frac{\sum N_i}{N_{\Sigma}}$, где $\sum N_i$ – суммарное число циклов действия соответствующего момента T_i в гистограмме нагрузок, N_{Σ} – суммарное число циклов нагружения за всё время работы привода.

Этот график носит название «режимного квадрата» и на нём представлены:

«0» – непрерывный режим эксплуатации $\frac{T_i}{T_{\max}} = 1$; $\frac{\sum N_i}{N_{\Sigma}} = 1$; характерный для приводов машин непрерывных технологических процессов, например, непрерывной разливки стали;



«I» – тяжёлый режим эксплуатации – отношение средневзвешенного момента к максимальному 0,77 – режим, характерный для горных машин;

«II» – средний равновероятный режим, упомянутое отношение моментов 0,5 – режим характерный для интенсивно эксплуатируемых машин автоматизированных производств;

«III» – средний нормальный режим – отношение моментов 0,5 – режим эксплуатации большинства универсальных машин, например, конвейеров;

«IV», «V» – лёгкий и особо лёгкий режимы эксплуатации – отношения средневзвешенного момента к максимальному соответственно 0,42 и 0,31 – режимы характерные для универсальных станков, конвейеров

для штучных грузов и т.п.

Понятие о режимах эксплуатации широко используется в подъёмно-транспортном машиностроении, где режимы эксплуатации кранов и их механизмов в России нормированы стандартами ГОСТ 25546-82; ГОСТ 25835-83; и соответствующим им более поздним стандартом ISO 4301/1-86.

Продолжительность включения электродвигателя (ПВ%) определяется за 10 минут работы, как отношение времени работы двигателя к суммарному времени цикла с учётом пауз, в течение которых двигатель остывает.

Таким образом, в настоящее время для оценки нагруженности редуктора используют статистические типовые режимы «0 – V» по ГОСТ 21354; для электродвигателей – режимы «S1 – S10» по IEC 34-1, или ПВ% по нормам Госгортехнадзора.

Соответствие методик выбора мотор-редукторов

Экспериментальные исследования показали, что существует однозначная зависимость между коэффициентами сервис фактора и режимами эксплуатации по ГОСТ 21354. Эти данные приведены в таблице ниже.

Режим эксплуатации по ГОСТ 21354	«0» – непрерывный	«I» – тяжёлый	«II» – средний равновесный.	«III» – средний нормальный	«IV» – лёгкий	«V» – особо лёгкий
Режим работы по ГОСТ 25835	6М	5М	4М	3М	2М	1М
Режим по правилам Госгортехнадзора	«ВТ» ПВ63-100%	«Т» ПВ40-63%	«С» ПВ25-40%	«С» ПВ25-40%	«Л» ПВ16-25%	«Л» ПВ<16%
<i>F.S.</i>	2,8 – 3,0	2,4 – 2,6	1,8 – 2,0	1,8 – 2,0	1,4 – 1,6	1,1 – 1,3

Для каждого из режимов эксплуатации, в интервале значений *F.S.*, большие значения соответствуют меньшим типоразмерам мотор-редукторов (см. диаграмму ниже).

