

Критерии выбора двигателей постоянного тока

Think ESCAP 6 D.C. Motor Selection Criteria

© Copyright 1990 Portescap

© Copyright 2002 перевод на Русский язык под редакцией Павлова С.В.

1. Введение

Двигатель это устройство, преобразующее электрическую энергию в механическую и служащее для перемещения нагрузки. Присущие этому процессу потери повышают температуру двигателя. Стоимость двигателя увеличивается при увеличении его габаритов. Основной проблемой выбора двигателя является определение минимально возможного двигателя для выполнения поставленной задачи. Таким образом, выбор двигателя зависит от возможности преобразования энергии и рассеивания тепловой энергии. Это два основных критерия, если перемещение нагрузки осуществляется продолжительное время. Третий критерий добавляется тогда, когда необходимо обеспечение позиционного перемещения нагрузки. В данном случае двигатель должен не только ускорять и замедлять нагрузку, но и свой ротор. Это так называемое дифференциальное движение, при котором момент инерции системы становится третьим главным параметром, влияющим на производительность.

Очевидно, что большинство применений налагают ограничения на уровень напряжения, тока, диаметр, длину и массу, не говоря уже о стоимости двигателя, отражающейся на всей системе и ее производительности.

Каталоги, выпускаемые изготовителями двигателей, содержат все данные, необходимые пользователю для оптимального выбора двигателя с целью выполнения поставленной задачи. На самом деле изготовители похожих двигателей не обязательно приводят одни и те же характеристики. Приводимые ими данные могут не соответствовать данным, необходимым для оптимального выбора двигателя.

Данная статья является первым обзором факторов, определяющих потери в двигателе и отражающих изменение температуры двигателя в продолжительном режиме работы. В ней также приводится анализ применения редукторов в различных приложениях. Подобными методами может быть проанализирована работа привода при дифференциально-возрастающем движении.

2. Рассмотрение тепловых режимов при непрерывном движении

Проблема состоит в том, чтобы выбрать двигатель, который должен обеспечить требуемый вращающий момент M при заданной угловой скорости. Вращающий момент двигателя постоянного тока равен произведению конструктивной постоянной двигателя и тока якоря:

$$M = k \times I \text{ [Nm, Nm / A, A]}$$

Мощность, рассеиваемая двигателем, равна произведению сопротивления ротора и квадрата тока:

$$P_d = R \times I^2 \text{ [W, , A]}$$

Это может быть записано как:

$$P_d = R \times M^2 / k^2 = R / k^2 \times M^2$$

где первый множитель характеризует двигатель, а второй нагрузку.

Превышение температуры ротора равно произведению рассеиваемой мощности и теплового сопротивления:

$$T = R I^2 \times R_{th} \text{ [} ^\circ\text{C, W, } ^\circ\text{C / W]}$$

Можно записать данное выражение в другой форме:

$$T = R_{th} \times R / k^2 \times M^2$$

в которой явно видны две различные части, зависящие от двигателя и нагрузки.

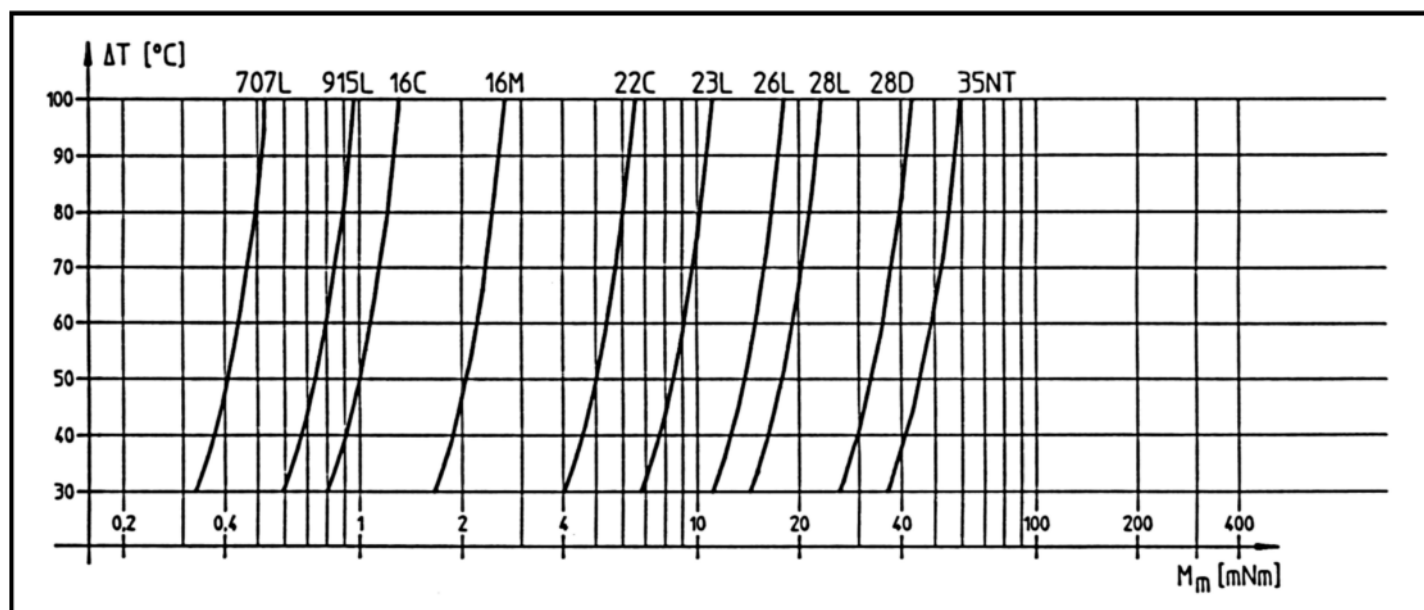
Очевидно, что основным критерием при непрерывном режиме работы привода является произведение регулятора двигателя (R/k^2) и его теплового сопротивления, измеряемого в $^\circ\text{C} / \text{Nm}^2$. На рис. 1 показаны зависимости момента от превышения температуры для нескольких двигателей escap®, построенных при учете общего теплового сопротивления (ротор-корпус и корпус-среда) равного $R_{th1} + 0.5 \times R_{th2}$

Критерием выбора двигателя при непрерывном режиме работы является значение

$$R_{th} \times R / k^2 \text{ [} ^\circ\text{C} / (\text{Nm})^2 \text{]}$$

Необходимо отметить, что при повышении температуры сопротивление ротора увеличивается на $0.39\% / ^\circ\text{C}$. Обычно в каталогах приводится величина сопротивления при температуре обмотки 22°C , при повышении температуры до 100°C сопротивление обмотки увеличится на 30%. Напряжение, необходимое для поддержания тока, должно также увеличиваться пропорционально температуре.

Рис.1: Превышение температуры ротора для двигателей escap® в зависимости от момента нагрузки. При увеличении размеров двигателя температурное сопротивление и конструктивная постоянная двигателя снижаются. Стандартные двигатели escap® имеют максимальную температуру ротора в диапазоне от 100 до 155°C .



3. Анализ непрерывного режима работы привода.

Пример безредукторного привода

Требуется обеспечение момента $M=5\text{мНм}$ для перемещения нагрузки при скорости 3000 об/мин ($\omega_L=314\text{ рад/с}$).

Зависимости момента от превышения температуры на рис. 1 показывают, что двигатель escar® типа 22С является наименьшим из возможных для выполнения данной задачи. Графики, приведенные в каталоге, подтверждают, что данная точка находится внутри диапазона возможных нагрузок в длительном режиме работы для выбранного двигателя.

На рис.2 приведены каталожные данные и эксплуатационные режимы для двигателя типа 22С и для большего двигателя типа 23L, а также для трёх обычных двигателей постоянного тока.

Самый маленький двигатель escar® имеет 2/3 массы и объёма от наименьшего двигателя с полым ротором (С). Обратите внимание на различие между двумя последними строчками рис. 2, превышения температуры двигателя, рассчитанные для "холодного" сопротивления двигателя (22 °С) и для фактически достигаемой ротором температуры. Эти данные получены из выражения:

$$(R = hot) = \frac{(R = R_{22})}{1 - 0,0039 \times (R = R_{22})}$$

Данной разницей в превышениях температуры двигателя пренебрегать нельзя.

Пример привода с редуктором, работающего в продолжительном режиме

Включение редуктора между двигателем и нагрузкой изменяет эксплуатационные свойства двигателя следующим образом:

Момент нагрузки, приведенный к валу двигателя, снижается в число раз, равное произведению передаточного числа редуктора на его КПД:

$$M_M = M_L \times i / \eta$$

Скорость нагрузки, приведенная к валу двигателя, возрастает пропорционально передаточному отношению редуктора

$$n_M = n_L \times i$$

Приведенный к валу двигателя момент инерции нагрузки уменьшается пропорционально квадрату передаточного отношения

$$J'_L = J_L \times i / i^2$$

Индекс L указывает связанные с нагрузкой параметры, а индекс M связанные с двигателем. J'_L момент инерции нагрузки, приведенный к валу двигателя.

Быстрый выбор необходимого редуктора для данной задачи может осуществляться с использованием графиков, показанных на рис. 3. На нём изображены основные условия, рекомендуемые для обеспечения высокой эффективности и надёжности для широкого диапазона двигателей escar® и редукторов.

Если требуются точные значения коэффициента передачи и КПД могут быть проверены и уточнены позднее.

Пример: необходимо обеспечение момента 500 мНм при скорости 20 оборотов в минуту. Для ясности на рис. 4 изображены характеристики, необходимые для данного примера.

Рис. 2. Сравнение двух двигателей escar® и трёх стандартных двигателей постоянного тока при работе с нагрузкой 5мНм / 3000 об/мин. Самый маленький стандартный двигатель (двигатель С), способный выполнить поставленную задачу, на 50% больше и тяжелее, чем самый маленький двигатель с беспазовым ротором (22С).

| Параметр | Единица измерения | Моторы escar® | | Типовые моторы | | |
|---------------------------------------|----------------------|---------------|-------|----------------|-------|-------|
| | | 22С | 23L | А | В | С |
| Диаметр x длина | мм. | 22x32 | 23x34 | 27x37 | 30x42 | 25x36 |
| Объем | см ³ | 12 | 14 | 22 | 29 | 18 |
| Масса | гр. | 54 | 70 | 75 | 100 | 80 |
| Вращающий момент | mNm | | | 4 | 7 | 3 |
| Стартовый момент | mNm | 10 | 14.9 | 12 | 22 | 15.5 |
| Холостые обороты | об/мин | 6000 | 7800 | 10600 | 4000 | 3600 |
| Ток холостого хода | mA | 6 | 20 | 60 | 55 | 20 |
| Тепловое сопротивление | °C/W | 33 | 23 | 30 | 27.5 | 32 |
| $R/k^2 \times 10^3$ | 1/Nms | 63 | 54 | 91 | 19 | 23 |
| Мех. временная константа | ms | 22 | 20 | | | 27 |
| Номинальное сопротивление | ом | 5.7 | 11.9 | 9.6 | 13.9 | 24 |
| Константа момента | mNm/A | 9.5 | 14.8 | 10.4 | 26.8 | 32.4 |
| $R_{th} \times R/k^2 \times 10^3$ | °C/(Nm) ² | 2079 | 1242 | 2730 | 521 | 736 |
| Потери $I^2 R_{22}$ | W | 1.615 | 1.52 | 2.8 | 0.81 | 0.73 |
| Повышение темп. (R=R ₂₂) | °C | 53 | 34.9 | 94 | 22 | 23.4 |
| Повышение темп. (R=R _{hot}) | °C | 67 | 35 | 132 | 24 | 26 |

Рис.3. Диаграмма выбора редукторного привода.

Для выбора необходимой комбинации двигателя и редуктора по заданным моменту и скорости вращения нагрузки указаны превышения температуры двигателя.

Рекомендованная входная скорость редуктора

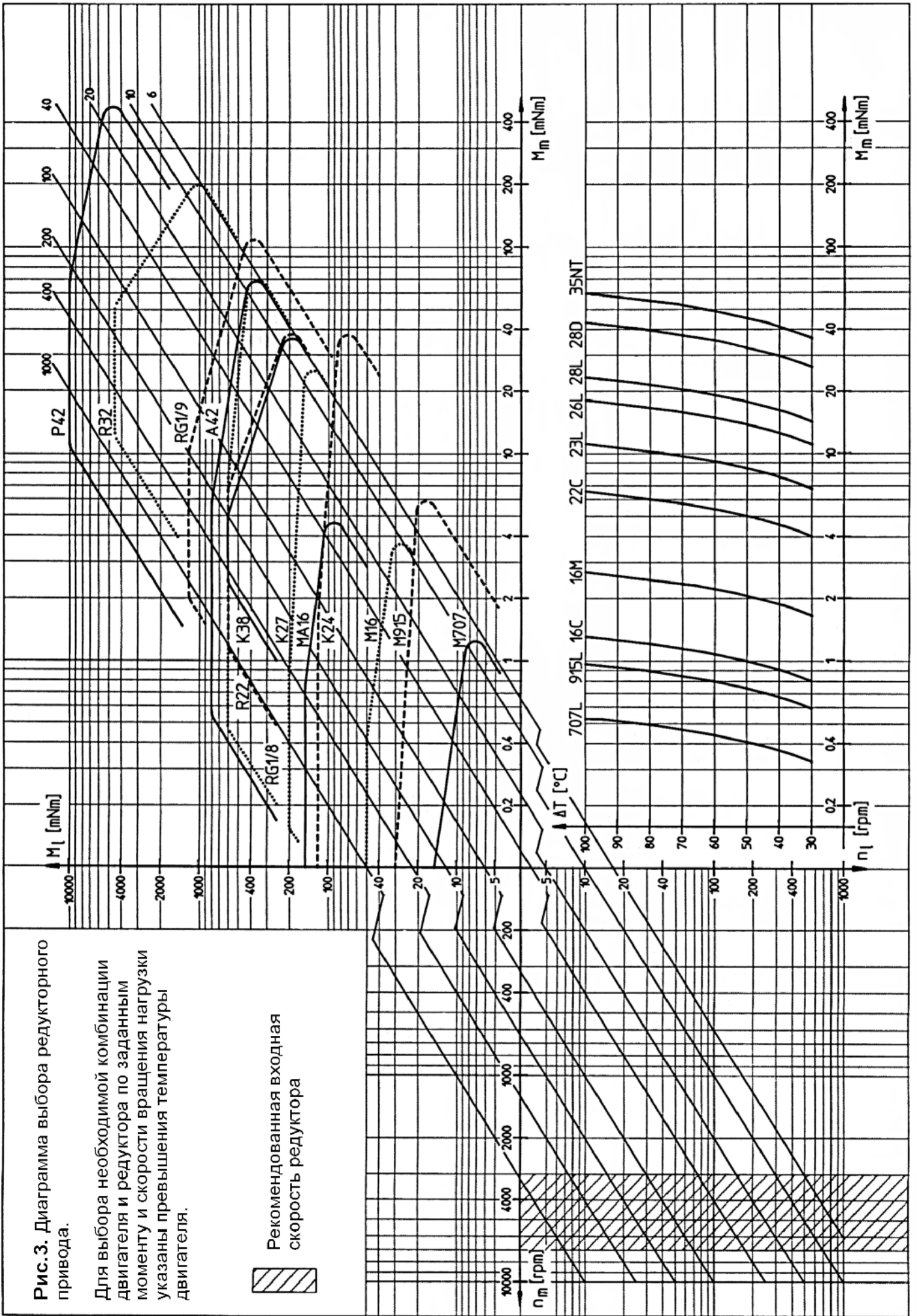
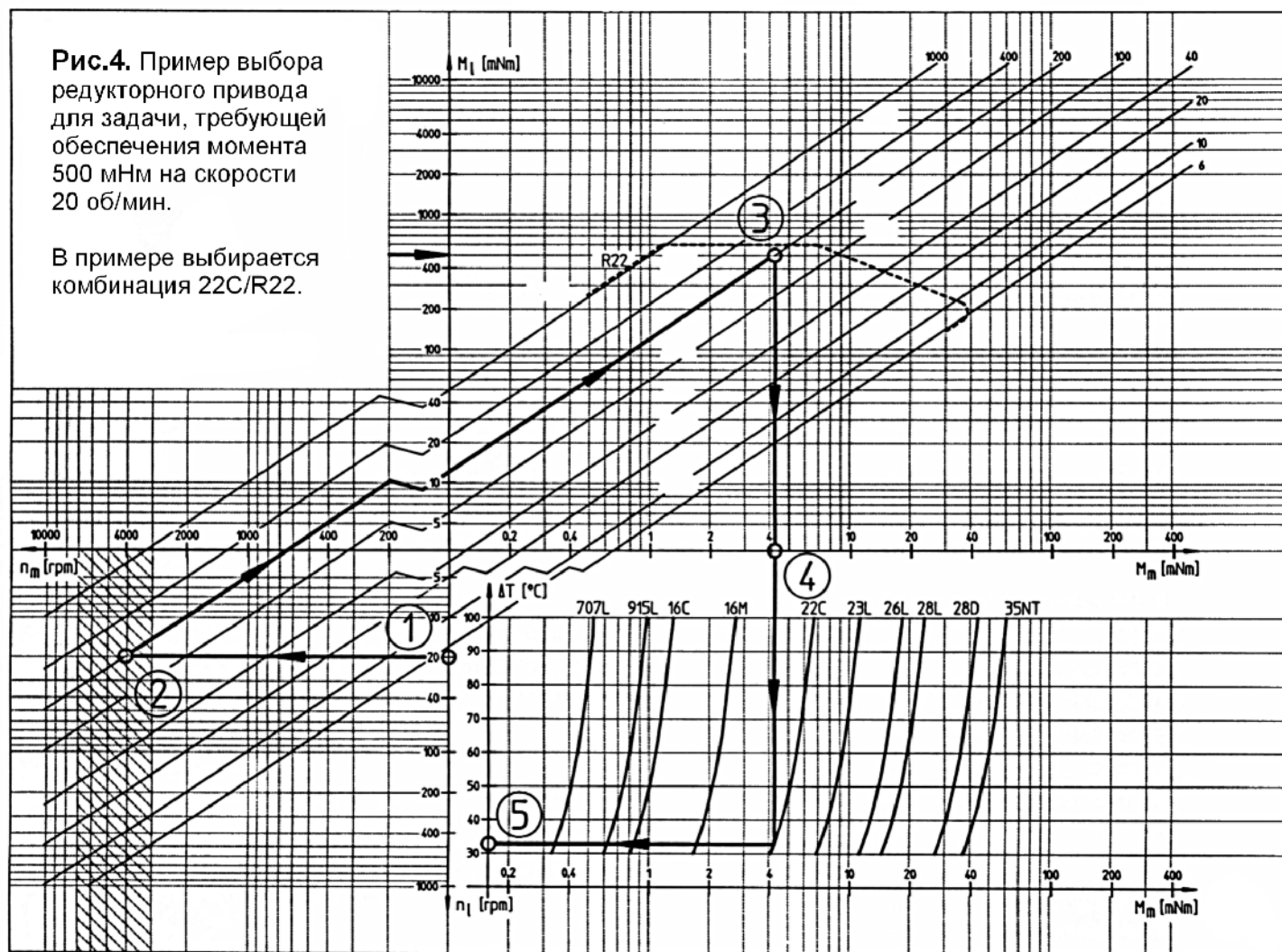


Рис.4. Пример выбора редукторного привода для задачи, требующей обеспечения момента 500 мНм на скорости 20 об/мин.

В примере выбирается комбинация 22С/R22.



Во-первых, скорость нагрузки 20 оборотов в минуту находится в нижней части оси ординат на интервале от 5 до 1000 оборотов в минуту (1). Оттуда проводим горизонтальную линию влево в область рекомендуемых скоростей двигателя. В этом примере выбираем скорость 4000 оборотов в минуту (2), что требует применения редуктора с передаточным отношением 200:1.

Через точку пересечения 20/4000 оборотов в минуту проводим диагональную линию вверх в первый квадрант до точки пересечения с линией, представляющей значение момента нагрузки 500 мНм (3). Пунктирная линия в первом квадранте показывает наиболее эффективную область работы редуктора.

На оси абсциссы можно легко найти момент двигателя, равный примерно 4.2 мНм (4).

Наконец, отдельный график, расположенный в четвертом квадранте, (тот же что и на рис. 1) показывает, что двигатель 22С является самым маленьким для выполнения поставленной задачи. Превышение температуры составляет чуть более 30 °С (5). Самое близкое передаточное отношение редуктора R22 и удовлетворяющий техническим требованиям двигатель семейства 22С выбираются из каталога.

Если графический выбор показывает, что превышение температуры является предельным для данного двигателя, должен быть произведен расчёт токов, используя точные значения передаточного отношения и КПД редуктора, или следует выбрать двигатель следующего типоразмера.

На рис. 4 показаны характеристики для редукторов типа R22. Горизонтальная линия показывает, что рекомендуемый максимальный момент равен 600 мНм при скорости около 20 оборотов в минуту. Для более высоких скоростей и меньшего коэффициента передачи момент снижается до 400 мНм при коэффициенте передачи порядка 33:1.

Две диагональные линии указывают самый низкий и самый высокий коэффициенты передачи, доступные для данного типа редукторов.

Таким образом кривая, показывающая диапазон работы каждого редуктора, зависит от:
 – максимального рекомендуемой входной скорости;
 --максимально рекомендуемого выходного момента;
 --наибольшего и наименьшего значения передаточного отношения редуктора.

4. Рассмотрение тепловых режимов при работе с ускорением

Режим работы с ускорением (дифференциальное движение) состоит из перемещения нагрузки, состоящей из инерции J_L и трения M_L , на угловое смещение φ_L (или массы m_L на линейное расстояние d_L) за время t . Нагрузка может соединяться с двигателем через редуктор с передаточным отношением i и КПД. Трение в нагрузке часто весьма незначительно по сравнению с моментом, необходимым для разгона и торможения (им обычно можно пренебречь).

Если бы ротор был бы безинерционным, то весь момент двигателя был бы доступен для обеспечения ускорения нагрузки. Инерция ротора увеличивает задержку перемещения по сравнению с идеальной ситуацией.

При использовании редуктора с передаточным отношением i , необходимое ускорение нагрузки становится равным i для вала двигателя (ускорение вала двигателя), тогда как приведенный момент инерции нагрузки становится равным

$$J_L' = J_L \times 1 / i^2$$

Если целью проектирования является минимизация потребляемой энергии для данного двигателя, то момент инерции нагрузки, приведённый к валу двигателя, должен быть равен моменту инерции ротора. Тогда получаем, что коэффициент редукции должен быть равен:

$$i_0 = \sqrt{J_L / J_M}$$

Увеличение этого коэффициента бессмысленно: приведенный момент инерции нагрузки будет стремиться к нулю, ускорение двигателя возрастает, но работа двигателя будет состоять в ускорении собственного ротора. Это означает завышенные габариты двигателя, а следовательно и более дорогое и неэкономичное решение. Также увеличились бы потери в двигателе вследствие большего значения регулятора двигателя R/k^2 . На практике при согласовании моментов инерции обеспечивают "оптимальное отношение времени перемещения к стоимости и потребляемой энергии".

Одним из первых шагов является выбор профиля скорости. Он может быть треугольным, параболическим или трапецеидальным, и выбирается в зависимости от необходимого пути перемещения.

В формулах рассеиваемой энергии для каждого из профилей:

R – суммарное сопротивление двигателя (Ом),
 $J^2 = J_M \times J_L$ ($= 4 J_M$ при одинаковых инерциях) (кг м^2),
 φ_L – угловое перемещение нагрузки (рад),
 k – конструктивная постоянная двигателя (НМА),
 t – длительность одного перемещения (с).

Треугольный профиль состоит из участка постоянного ускорения и участка постоянного замедления. Данный профиль прост в расчётах, но является неэкономичным по условиям рассеиваемой мощности. Часто имеются ограничения на его применение из условия максимально возможной скорости.

$$E_d = 64 \times \frac{R J^2 \varphi_L^2}{k^2 t^3}$$

Параболический профиль обеспечивает самое высокое начальное ускорение, что снижает потери времени на движение с низкими скоростями. Данный профиль имеет минимальное рассеивание энергии, но его реализация довольно сложна.

$$E_d = 48 \times \frac{R J^2 \varphi_L^2}{k^2 t^3}$$

Трапецеидальный профиль является хорошим компромиссом и он достаточно просто реализуем. Всё время движения разделено на три равные части: ускорение, равномерное движение и замедление. Общее математическое описание рассеиваемой мощности при трапецеидальном профиле представлено в приложении.

$$E_d = 54 \times \frac{R J^2 \varphi_L^2}{k^2 t^3}$$

Рассмотрим движение с ускорениями при реализации трапецеидального профиля скорости. Принимая во внимание, что цикл работы выполняется с частотой n циклов в секунду, рассеиваемая мощность равна:

$$P_d = 54n \times \frac{R J_M J_L^2}{k^2 t^2}$$

Превышение температуры:

$$= P_d \times R_{th} = \frac{R}{k^2} \times J_m \times R_{th} \times \frac{J_L \varphi_L^2}{t^3} \times 54n$$

Как и раньше первый член формулы зависит только от двигателя, а второй только от нагрузки. Важно то, что часть выражения, зависящая от двигателя, определяется постоянными параметрами двигателя и не зависит от параметров привода (пренебрегая дополнительным нагревом двигателя за счёт формы тока). Поэтому, очень легко сравнивать различные двигатели.

Критерий выбора при обеспечении движения с ускорениями:

$$R/k^2 \times J_m \times R_{th} \text{ (} \text{с}^\circ\text{C/Вт)}$$

Дополнительное превышение температуры, вызванное потерями мощности, рассеиваемыми дополнительными токами (не током нагрузки), а также трением в системе может быть просто вычислено и учтено.

Произведение $M = J_m \times R / k^2$

является механической постоянной времени двигателя. Как показано выше, основным критерием выбора является произведение механической постоянной времени двигателя и теплового сопротивления двигателя или момент инерции, умноженный на превышение температуры, делённый на квадрат момента.

5. Анализ режима работы с ускорениями и пример расчёта

Инерция нагрузки $J_L = 5 \times 10^{-6}$ кгм² должна быть перемещена на угол 0.6 радиан (34°) за время 18 мс и сопровождаться паузой 10 мс. Профиль скорости трапецеидальный, время ускорения, замедления и движения с постоянной скоростью равно 6 мс. Это принято с учетом того, что редуктор между двигателем и нагрузкой имеет передаточный коэффициент, согласующий их моменты инерции.

Превышение температуры двигателя:

$$= R_{th} \times m \times \frac{J_L \cdot i^2}{t^3} \times 54n$$

Часть, зависящая от нагрузки, равна:

$$(J_L^2 / t^3) \times 54n = 5 \times 10^{-6} \times 0,6^2 / 0,018^3 \times 54 \times 36 = 571 \text{ [W/s]}$$

На рис. 6 указаны параметры 2 типов двигателей escar® и 3 обычных двигателей постоянного тока, приведены величины механической постоянной времени и теплового сопротивления. Расчётное значение превышения температуры верно для инерциальной нагрузки без трения и коэффициента передачи редуктора, согласующего моменты инерции. Данное значение не включает рассеивание энергии из-за тока холостого хода.

Рис 6. Сравнение двух двигателей фирмы Portescap с тремя двигателями с пазовым ротором для применения в приводах с ускорениями. Самый маленький из традиционных двигателей (двигатель С), удовлетворяющий поставленным требованиям, в 6 раз больше и в 4 раза тяжелее самого маленького двигателя escar® (28DT).

| Параметр | Единица измерения | Моторы escar® | | Типовые моторы | | |
|---------------------------------|---------------------|---------------|-------|----------------|-------|--------|
| | | 23DT | 28DT | А | В | С |
| Диаметр x длинна | мм. | 23x49 | 28x63 | 40x56 | 52x85 | 52x105 |
| Объем | см ³ | 20 | 38 | 72 | 180 | 223 |
| Масса | гр. | 110 | 200 | 252 | 640 | 860 |
| Инерция ротора | гр. см ² | 6.1 | 20 | 32 | 300 | 400 |
| $R/k^2 \times 10^3$ | 1/Nms | 18 | 5.7 | 2.86 | 0.49 | 0.3 |
| t_M | ms | 11 | 11 | 9.2 | 16 | 14 |
| R_{th} | °C/W | 177 | 11.5 | 19.1 | 11 | 9 |
| $t_M \times R_{th}$ | s °C/W | 0.187 | 0.12 | 0.176 | 0.176 | 0.126 |
| Повышение темп. ($R=R_{hot}$) | °C | 186 | 102 | 168 | 168 | 101 |

6. Заключение

Было показано, что для выбора двигателей постоянного тока основополагающим является произведение коэффициента R/k^2 и теплового сопротивления двигателя:

$$R/k^2 \times R_{th}$$

При движении с ускорениями необходимо учитывать ещё и момент инерции ротора:

$$J \times R/k^2 \times R_{th}$$

что является произведением механической постоянной времени и теплового сопротивления двигателя.

Отметим, что двигатели “А” и “Б” разных производителей весьма различаются массой и размерами, но имеет одинаковое значение превышения температуры. Все двигатели имеют рабочую температуру ротора до 155 °С. Двигатели с полым ротором имеют меньшее значение теплового сопротивления, чем двигатели с ротором, выполненным с металлическим сердечником. Снижение времени перемещения с 18 до 15 мс, казалось бы, имеет небольшую важность (17%), так как вызывает увеличение возможного количества циклов в секунду с 40 против 36. Однако часть выражения, зависящая от нагрузки, возрастает до 1152 против 571, что вызывает удвоение превышения температуры для двигателя и поэтому необходимо применение большего двигателя. Часто коэффициент редуктора не идеально согласовывает моменты инерции двигателя и нагрузки. В таком случае необходимо увеличение требуемой мощности на коэффициент, зависящий от идеального передаточного отношения редуктора и фактического передаточного отношения:

$$= \frac{1}{4} \frac{i}{i_0} + \frac{i_0^2}{i}$$

Если нагрузка имеет трение, то рассеиваемая мощность будет выше при $i < i_0$ и ниже при $i > i_0$.

Многие производители двигателей постоянного тока не всегда публикует величины, необходимые для оптимального выбора двигателя, что делает оптимальный выбор сложным.

В дополнение к собственным постоянным двигателям в каталог двигателей escar® включены графики, показывающие диапазон работы двигателя в продолжительном режиме (определён по произведению регулятора двигателя на тепловое сопротивление), а также диапазон временной работы для дифференциального режима работы.

Также рассмотрен и включен графический метод выбора двигателей и редукторов для большинства приводов.

7. Приложение: нахождение рассеиваемой мощности при трапецеидальном профиле скорости.

Угловая скорость двигателя:

$$= 1/2 \quad i / 1/3t = 3 \quad i / 2t$$

Значение ускорения при разгоне и замедлении

$$= \quad / 1/3t = \quad i / 2t^2$$

Момент на участке разгона:

$$M = (J_M + J_L / i^2) \times \quad = (J_m + J_L / i^2) \times 9 \quad i / (2t^2)$$

Ток двигателя:

$$I = M_M / k = 1/k \times (J_M + J_L / i^2) \times 9 \quad i / (2t^2)$$

Рассеиваемая мощность:

$$P_d = RI^2 = R/k^2 \times \left\{ (J_m + J_L / i^2) \times 9 \quad i / (2t^2) \right\}^2 = R/k^2 \times (81 \quad i^2) / 4t^4 \times (J_m + J_L / i^2)^2$$

Джоулева энергия за один цикл:

$$E = 54/4t^3 \times R/k^2 \times \quad i^2 \times (J_M + J_L / i^2)^2$$

При замене $J_L / i^2 = J_m$ (при согласованных моментах инерции) выражение будет иметь вид:

$$E = 54/4t^2 \times R/k^2 \times \quad i^2 \times 4J_M^2 = J_M R/k^2 \times 54 \times J_L \quad / t^3$$

Первый член определяется только двигателем, второй - нагрузкой.