

ОСОБЕННОСТИ ВЫБОРА УСТАВОК ТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЕМ ВЫШЕ 1 КВ

В.В. КУРГАНОВ, А.Г. БАРАНОВ

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого»,
Республика Беларусь*

Перегрузка электродвигателя (ЭД) вызывает чрезмерный нагрев обмоток и может привести к повышенному износу или разрушению изоляции. Защита от перегрузки ЭД на аналоговых реле выполняется с использованием обратнoзависимой от тока выдержкой времени (индукционный элемент реле типа РТ-82). Вместе с тем, такой принцип выполнения защиты не отслеживает температуру защищаемого объекта. При повторном пуске ЭД с горячего состояния реле РТ-82 имеет такую же выдержку времени, как и при пуске холодного двигателя.

Более совершенный принцип выполнения защиты от перегрузки используется в современных микропроцессорных цифровых реле типов Seram 2000, Spam 150, БМРЗ и др., в которых температура ЭД косвенно отслеживается как при нагреве, так и при охлаждении. Защита срабатывает, когда интегральная температура превысит допустимое значение.

Тепловая модель двигателя описывается следующим выражением [1]:

$$\theta = I_*^2 (1 - e^{-t/T}) + \theta_{нач} e^{-t/T} p, \quad (1)$$

где θ – интегральная температура модели в относительных единицах; $\theta_{нач}$ – начальная температура (температура предшествующего режима); I_* – кратность тока перегрузки по отношению к значению номинального тока двигателя, увеличенному на 5%; t – текущее время, с; T – тепловая постоянная времени двигателя, с; p – коэффициент изменения начальной температуры модели, значение которого принимается в зависимости от заданных условий.

Первое слагаемое выражения (1) отражает процесс нагрева, а второе – охлаждение двигателя.

В отечественной практике возникают затруднения при определении тепловой постоянной времени T , поскольку в паспортах на двигатели и каталогах нет данных о ее величине. В качестве тепловой характеристики ЭД в зарубежной практике используется параметр t_{6x} , под которым подразумевается предельно допустимое время нахождения холодного двигателя в заторможенном состоянии при 6-кратном токе. У обычных двигателей параметр t_{6x} превышает максимальное время пуска примерно в два раза ($t_{6x} \approx 2 t_{пуск.маx}$) [2].

Для определения связи между параметром t_{6x} и постоянной T , решим уравнение (1) относительно t :

$$t_{откл.} = T \ln[(I_*^2 - Q_{нач} p)/(I_*^2 - Q_{откл.})]. \quad (2)$$

Приняв за предельно допустимую температуру 110 %, при которой необходимо отключить ($Q_{\text{откл}} = 1,1$), получим:

$$t_{\text{6x}} = T \ln[(6^2 - 0 \cdot 0,5)/(6^2 - 1,1)] = T/32.$$

Отсюда постоянную времени нагрева T_n можно определить по следующей формуле: $T_n = 60 \cdot t_{\text{пуск.мах}}$, где $t_{\text{пуск.мах}}$ – время пуска, определяемое из опыта пуска ЭД при его полной загрузке. В условиях эксплуатации значение $t_{\text{пуск.мах}}$ зачастую невозможно определить, так как двигатели, как правило, запускаются с разгруженными механизмами. Известно, что время пуска ЭД находится в обратно пропорциональной зависимости от избыточного момента на валу (разностью между электромагнитным моментом и моментом сопротивления приводного механизма) [3]. Поэтому в первом приближении можно записать:

$$T_n = 60 t_{\text{пуск.опыт}} / \kappa_3, \quad (3)$$

где κ_3 – коэффициент загрузки ЭД на момент проведения опыта пуска.

После отключения ЭД процесс его остывания характеризуется постоянной времени остывания T_0 , значение которой намного больше постоянной времени нагрева: $T_0 = (2 \div 4) T_n$. Это объясняется отсутствием принудительной вентиляции остановленного двигателя [3].

Ниже на конкретном примере показано, как тепловая модель цифрового реле отслеживает температуру обмотки двигателя при его включении и отключении.

Предположим, из каталога и опытных данных известно, что кратность пускового тока двигателя равна $6I_{\text{ном}}$, а время пуска при полной загрузке – $t_{\text{пуск}} = 5$ сек, тогда $T_n = 60 \cdot 5 = 300$ с; $T_0 = 4T_n = 4 \cdot 300 = 1200$ с.

Согласно правилам технической эксплуатации (ПТЭ) двигателя обязаны обеспечивать 2 пуска из холодного состояния и 1 из горячего состояния. Поэтому в тепловой модели принимаем $p = 0,5$ при $I_{\text{дв}} > 1,05I_{\text{ном.дв}}$ и $p = 1$ при $I_{\text{дв}} \leq 1,05I_{\text{ном.дв}}$.

При включении двигателя из холодного состояния ($\theta_{\text{нач}} = 0$) температуру его обмотки к концу пуска определим по (1):

$$u = I_*^2 (1 - e^{-t/T}) + 0 = (6/1,05)^2 (1 - e^{-5/300}) = 0,54,$$

то есть двигатель будет нагрет до 54 % допустимой температуры. Здесь и далее температура окружающей среды не учитывается.

Если после окончания пуска двигатель перейдет в режим нормальной работы с номинальным током, то процесс изменения температуры будет описываться выражением (1), в котором коэффициент $p = 1$. Например, спустя 10 мин (600 с) после пуска температура двигателя составит:

$$u = (1/1,05)^2 \cdot (1 - e^{-600/300}) + 0,54e^{-600/300} \cdot 1 = 0,86 \quad (86 \%).$$

Установившееся же значение температуры двигателя нормального режима при $t = \infty$ составит:

$$u = I_*^2 = (1/1,05)^2 = 0,91.$$

Можно показать, что защита разрешит пуск двигателя, работающего с полной нагрузкой, и из горячего состояния при температуре равной 91 % (здесь p принимается равным 0,5):

$$\theta = (6/1,05)^2 \cdot (1 - e^{-5/300}) + 0,91e^{-5/300} \cdot 0,5 = 0,987.$$

Как видно, при самозапуске ЭД (из горячего состояния) температура обмоток не превысит допустимого значения и в процессе установившейся работы его температура снова установится на уровне 91 %.

Проверим требование ГОСТ183-74 на отечественные электродвигатели, допускающего нахождение ЭД в течение 2 минут в режиме перегрузки 1,5-кратным током:

$$\theta = (1,5/1,05)^2 \cdot (1 - e^{-120/300}) + 0,91e^{-120/300} \cdot 0,5 = 100 \%.$$

Следовательно, требования ГОСТа выполняются.

Определим температуру ЭД через 25 мин после его отключения:

$$\theta = 0 + 0,91e^{-1500/1200} \cdot 1 = 0,26.$$

Поскольку процесс нагрева и охлаждения двигателя происходит по экспоненциальному закону, то для его полного остывания должно пройти время не менее $3T_0 = 3 \cdot 1200 = 3600$ с, т. е. 1 час.

Рассмотренная тепловая модель справедлива и для трансформаторов, но в этом случае принимают $T_n = T_0$ и $p = 1$.

В качестве уставок защиты от перегрузки в цифровое реле, например, Sepam 2000, вводят значения постоянных времени T_n и T_0 , а также температуру в процентах, при которой защита должна действовать на сигнал и на отключение, например, 98 % и 110 %, соответственно.

При аварийном отключении ЭД защитой от перегрузки его пуск в дальнейшем блокируется до охлаждения двигателя до заданной температуры.

Цифровые реле измеряют значения симметричных составляющих токов прямой и обратной последовательностей ($I_{пр}$ и $I_{обр}$). Последняя появляется при несимметрии и неполнофазном режиме. Составляющая обратной последовательности генерирует в роторе двигателя токи значительной амплитуды, которые создают существенное повышение температуры в обмотке ротора. Повышенная интенсивность нагрева двигателя при появлении тока обратной последовательности учитывается в тепловой модели следующим образом.

Вычисляется эквивалентный ток: $I_{эkv} = \sqrt{I_{пр}^2 + KI_{обр}^2}$, где K – коэффициент усиления влияния тока обратной последовательности на допустимую перегрузку.

При отсутствии необходимых данных значение K принимается равным 4 для отечественных двигателей и около 6 для зарубежных [4]. Вычисление кратности тока I_* в выражениях (1) и (2) производится по величине эквивалентного тока.

Например, определим предельное время перегрузки двигателя при неполнофазном режиме (обрыв фазного провода). В этом случае, поскольку $I_{пр} = I_{обр}$, значение эквивалентного тока составит:

$$I_{эkv} = \sqrt{I_{пр}^2 + 4I_{пр}^2} = 2,236I_{пр}.$$

Подставив в (2) значение $I_{э\text{кв}}$, получим:

$$t_{\text{откл.}} = 300 \ln \frac{(2,236/1,05)^2 - 0,91 \cdot 0,5}{(2,236/1,05)^2 - 1} = 52 \text{ с.}$$

Следовательно, данный двигатель при неполнофазном режиме отключится защитой от перегрузки за время около 52 с.

На современных цифровых реле имеется возможность выполнить защиту двигателя от затяжного пуска и заклинивания ротора. Первая защита срабатывает и отключает двигатель, если ток двигателя от начала процесса пуска превышает значение $3I_{\text{ном}}$ в течение заданного времени $t_1 \approx 2t_{\text{пуск}}$. Начало пуска обнаруживается в момент увеличения потребляемого тока от 0 до значения более 5 % номинального тока. Вторая защита срабатывает, если пуск завершен, двигатель работает нормально и в установившемся режиме неожиданно ток двигателя достигает значения более $3I_{\text{ном}}$ и держится в течение заданного времени $t_2 = 3 \div 4 \text{ с.}$

Заключение

Таким образом, для уточнения уставок тепловой защиты двигателя в условиях эксплуатации необходимо провести опыт пуска ЭД при максимально возможной его нагрузке и по формуле (3) вычислить значение первой уставки T_n цифрового реле. В зависимости от условий охлаждения остановленного двигателя и его конструкции (естественная или принудительная вентиляция, ЭД на открытом воздухе или в закрытом помещении, взрывозащищенное исполнение ЭД и т. д.), определяется вторая уставка $T_0 = (2 \div 4)T_n$. Чем больше принята уставка T_0 , тем хуже условия охлаждения и, следовательно, при отключении ЭД защитой от перегрузки цифровое реле разрешит его повторный пуск через более продолжительное время. Третья и четвертая уставки – это предельная интегральная температура двигателя, с превышением которой реле действует сначала на сигнал $Q_{\text{сигн.}} = (95-100) \%$, а затем на отключение $Q_{\text{откл.}} = (110-115) \%$.

Литература

1. Корогодский В.И. и др. Релейная защита электродвигателей напряжением выше 1 кВ. – М.: Энергоатомиздат, 1987.
2. Motor protection relay SPAM 150 C. Asea Brown Boveri. 34 SPAM 8 EN 1 F, 1993-05-10.
3. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных электродвигателей. – М.: Госэнергоиздат, 1963.
4. Информационные материалы по цифровым реле ALSTOM и SEPAM 2000.

Получено 17.11.2004 г.