

О ПЕРЕГРУЗОЧНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКЕ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ И ЗАЩИТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКЕ УСТРОЙСТВА ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ОТ ПЕРЕГРУЗКИ ПО ТОКУ

В.В. Гурин, канд. техн. наук, доцент, Е.В. Лавцевич, аспирантка (УО БГАТУ)

Аннотация

В статье рассмотрены методики определения перегрузочной характеристики асинхронного электродвигателя по износу изоляции и допустимому нагреву обмотки. Показано, что для универсальных комплексных защит асинхронных двигателей перегрузочную характеристику двигателей следует определять по допустимому нагреву с горячего состояния. Определены уравнения для расчета перегрузочной характеристики электродвигателя и защитной характеристики устройства защиты. Введены ограничения по кратности тока перегрузки и по времени срабатывания защиты при пусковом токе.

Введение

Под перегрузочной характеристикой электродвигателя $t_{\text{доп}}=f(I_{\text{пер}})$ понимается зависимость допустимого времени существования перегрузки от тока. За допустимое время перегрузки происходит допустимый нагрев обмотки электродвигателя. Обычно вместо тока перегрузки записывают кратность тока перегрузки по току $k_{\text{пер}}=I_1/I_{\text{ном}}$, тогда $t_{\text{доп}}=f(k_{\text{пер}})$.

Под защитной характеристикой устройства защиты понимается подобная зависимость $t_{\text{ср}}=f(k_{\text{пер}})$, в которой $t_{\text{ср}} \leq t_{\text{доп}}$. Следовательно, защитная характеристика устройства защиты должна проходить ниже перегрузочной характеристики электродвигателя или соответствовать перегрузочной характеристике электродвигателя. Отсюда следует, что для проектирования устройства защиты электродвигателя от перегрузки крайне важно знать перегрузочную характеристику защищаемого электродвигателя. Определение требуемой защитной характеристики устройств защиты от перегрузки по току является целью данной статьи. Ниже приводится расчет и обоснование этой характеристики.

Основная часть

Известны два подхода к определению перегрузочной характеристики асинхронного электродвигателя. В первой методике рассчитывается износ изоляции обмотки при заданной кратности тока перегрузки и известном числе перегрузок в году за срок службы электродвигателя.

Р.М.Славин в [1, с.290] использует метод расчета, основанный на зависимости срока службы изоляции от температуры. Расчетная формула имеет вид:

$$D = B \cdot e^{-k\theta}, \quad (1)$$

где D , B – текущий и начальный срок службы изоляции (лет, месяцев, дней, часов, секунд);

k – коэффициент; для класса изоляции А коэффициент $k=0,088^\circ\text{C}^{-1}$, для класса изоляции В коэффициент $k=0,069^\circ\text{C}^{-1}$;

θ – длительно действующая температура нагрева изоляции, $^\circ\text{C}$.

Обозначим рекомендуемую температуру нагрева θ_p . Соответствующий ей рекомендуемый срок службы изоляции обозначим D_o . Тогда можно записать:

$$D_o = B \cdot e^{-k\theta_p}. \quad (2)$$

Произвольную температуру нагрева выразим

$$\theta = \theta_p + \Delta\theta, \quad (3)$$

где $\Delta\theta$ – разница между действительной и рекомендуемой температурой, $^\circ\text{C}$.

Подставляя (3) в (2), с учетом (1) можно записать:

$$D = D_o \cdot e^{-k\Delta\theta}. \quad (4)$$

В уравнении (4), изменяя $\Delta\theta$, можно получить новое значение срока службы изоляции обмотки.

В [1, с.308] показано, что при расчете перегрузочной характеристики следует учитывать число перегрузок в году (50...100), число часов использования электродвигателя в году, постоянную времени нагревания электродвигателя.

Первая методика расчета основана на линейной аппроксимации кривой нагрева и кусочно-линейной аппроксимации кривой охлаждения. На графике естественных износов изоляции строятся кривые зависимости дополнительного износа от времени. В точке пересечения кривых естественного и дополнительного износов изоляции получаем выдержку времени, соответствующую данной кратности тока перегрузки и выбранным значениям постоянных времени нагрева и охлаждения. Выполняя этот расчет для различных кратностей тока перегрузки, получаем перегрузочную характеристику электродвигателя. Анализ показывает, что эта методика не приемлема для универсальных устройств защиты, рассчитанных для группы электродвигателей.

И.А. Сыромятников, исследуя износ изоляции электродвигателя при перегрузке, делает два вывода:

1) “износ изоляции обмотки происходит практически только за время охлаждения обмотки” (т.е. износ изоляции в период перегрузки незначительный) [2, с.149];

2) “перегрузочная характеристика электродвигателя, построенная из условия одинакового износа, практически не отличается от перегрузочной характеристики, построенной из условия одинакового значения допустимого превышения температуры. Поэтому при определении допустимого времени перегрузки можно не производить громоздких вычислений износа изоляции...” [2, с.150].

По второй методике определяется допустимое время нахождения электродвигателя под током перегрузки, в течение которого обмотка электродвигателя нагревается до допустимой температуры. Эта методика не требует указанных выше данных и поэтому более приемлема для универсальных устройств защиты. Но она требует знания допустимой температуры обмотки (по классу изоляции) и температуры обмотки электродвигателя при номинальном токе, расчет которой затруднен. Выход из этого положения подсказывает ГОСТ 51689 – 2000 [3]. Он определяет допустимую температуру срабатывания защиты, измеренную методом сопротивления, в соответствии с табл.1.

Таблица 1. Допустимая температура обмотки при срабатывании защиты

Режим	Обозначение температуры	Допустимая температура обмотки, °С для класса нагревостойкости изоляции	
		В	Ф
Перегрузки	$\theta_{\text{доп.пер}}$	145	170
Пусковой или стопорный	$\theta_{\text{доп.стоп}}$	200	225

Значения температур установившегося теплового режима электродвигателей приведены в табл.2.

Таблица 2. Значения температур для различных классов нагревостойкости систем изоляции электродвигателей серии 4А и АИР

Тепловой режим	Температура	Значения температуры, °С для классов нагревостойкости	
		В	Ф
Установившийся	Предельно допустимая (максимальное значение) $\theta_{\text{доп.макс}}$	130	155
	Предельно допустимая (среднее значение, определяемое методом сопротивления) $\theta_{\text{доп.ср}}$	120	140

Исследование допустимого времени нагревания электродвигателя при перегрузках надо производить с горячего состояния, поскольку режим перегрузки с

горячего состояния всегда опаснее режима перегрузки с холодного состояния.

И.А. Сыромятников, исследуя превышения температуры обмоток при перегрузках с горячего состояния, предложил [2,с.137] определять допустимое время перегрузки без учета теплоотдачи по формуле:

$$t_{\text{доп}} = \frac{T_M}{(k_{\text{пер}}^2 - 1)} \frac{(\theta_{\text{доп}} - \theta_{\text{ном}})}{\tau_{\text{м.ном}}}, \quad (5)$$

где T_M – постоянная времени нагревания обмотки, с;

$\theta_{\text{доп}}$, $\theta_{\text{ном}}$ – температура допустимая, определяемая классом изоляции, и номинальная (при номинальном токе), °С;

$\tau_{\text{м.ном}}$ – превышение температуры обмотки над окружающей средой, определяемое ее собственными потерями, т.е. без учета тех составляющих потерь, которые обусловлены притоком теплоты от других источников, в частности, потерь в стали, вентиляционных и других, °С.

Превышение температуры:

$$\tau_{\text{м.ном}} = \theta_{\text{м.ном}} - 40, \quad (6)$$

где $\theta_{\text{м.ном}}$ – температура обмотки от ее собственных потерь, °С;

40 – температура окружающей среды по нормам МЭК 34-1, °С.

Постоянная времени нагревания обмотки по [2, с.135]:

$$T_M = \frac{150}{j_{\text{ном}}^2} \tau_{\text{м.ном}}, \quad (7)$$

где $j_{\text{ном}}$ – номинальная плотность тока, А/мм².

Подставляя (7) в (5), можно найти:

$$t_{\text{доп}} = \frac{150(\theta_{\text{доп}} - \theta_{\text{ном}})}{j_{\text{ном}}^2 (K_{\text{пер}}^2 - 1)}. \quad (8)$$

В уравнении (8) номинальная температура обмотки $\theta_{\text{ном}}$ в самом худшем случае, при температуре наружного воздуха $\theta_{\text{нар.возд}} = 40$ °С, не может превышать значений $\theta_{\text{доп.ср}}$ из табл.2, а $\theta_{\text{доп}}$ не может превышать значений температуры обмотки при срабатывании защиты из табл.1. Кроме того, следует учитывать, что номинальная температура нагрева обмотки изменяется с изменением температуры наружного воздуха. Это изменение, в соответствии с [4], можно учесть коэффициентом:

$$K_{\theta} = \frac{235 + \theta_{\text{нар.воз}}}{275}. \quad (9)$$

С учетом этих особенностей уравнение (8) будет иметь вид:

$$t_{\text{доп}} = \frac{150(\theta_{\text{доп.пер}} - K_{\theta} \theta_{\text{доп.ср}})}{j_{\text{ном}}^2 (K_{\text{пер}}^2 - 1)} = \frac{150_{\Delta} \theta}{j_{\text{ном}}^2 (K_{\text{пер}}^2 - 1)}, \quad (10)$$

где $_{\Delta} \theta = \theta_{\text{доп.пер}} - K_{\theta} \theta_{\text{доп.ср}}$.

Уравнение (10) является основным уравнением для определения $t_{\text{доп}}$ с горячего состояния, учитывая температуру окружающей среды.

В табл.3 приведены значения температуры, используемые в расчетах для электродвигателей серий 4А и АИР различных габаритов.

Таблица 3. Параметры, характеризующие нагрев электродвигателя серии 4А и АИР при перегрузках

Параметр	Значения номинальных температур, °С для серий электродвигателей				
	4А		АИР		
Высота оси вращения, мм	50..132	160..355	45..63	71..250	≥280
Класс нагревостойкости	В	F	В	В(F)	F
*Допустимая средняя температура, определенная методом сопротивления, $\theta_{доп.ср.}$, °С	120	140	120	120	140
Температура срабатывания защиты при перегрузке $\theta_{ср.заш.}$	145	170	145	145(170)	170
$\Delta \theta = \theta_{доп.пер.} - K_{\theta} \theta_{доп.ср.}$, при $K_{\theta}=1$, °С	25	30	25	**27,5	30

* Указанная средняя допустимая температура соответствует температуре окружающей среды + 40°С.
** Среднее значение $\Delta \theta$ для классов В и F.

С учетом данных табл.3, уравнение (10) запишется, например, для электродвигателей класса нагревостойкости В серии 4А (с высотой оси вращения 50...132 мм) и серии АИР (с высотой оси вращения 45...63 мм) в виде:

$$t_{доп.} = \frac{3750}{j_{ном}^2 (K_{пер}^2 - 1)} = \frac{C_1}{(K_{пер}^2 - 1)}, \quad (11)$$

где $C_1=3750/j_{ном}^2$.

Для электродвигателей класса нагревостойкости F серии 4А (с высотой оси вращения 160 мм и более) и серии АИР(с высотой оси вращения 280 мм и более):

$$t_{доп.} = \frac{4500}{j_{ном}^2 (K_{пер}^2 - 1)} = \frac{C_2}{(K_{пер}^2 - 1)}, \quad (12)$$

где $C_2=4500/j_{ном}^2$.

По (11) и (12) выполнены расчеты перегрузочных характеристик электродвигателей серии 4А мощностью 0,37, 2,2, 7,5 и 55 кВт (рис.1) с использованием данных, приведенных в [5].

Во введении к данной статье показано, что минимальная перегрузочная способность электродвигателя может быть принята в качестве защитной характеристики устройства защиты от перегрузки. Следуя этой рекомендации, будем считать, что уравнения

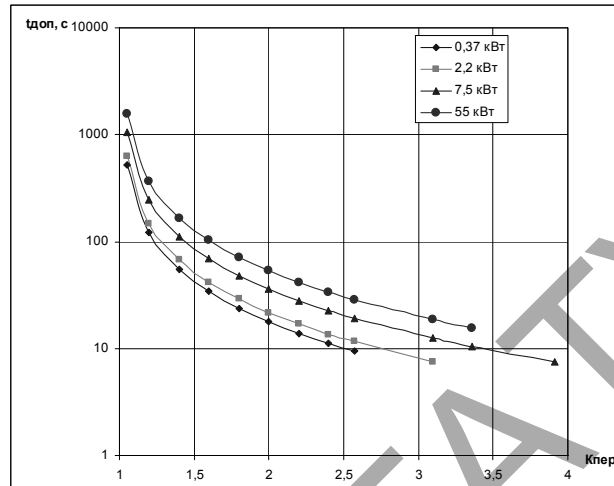


Рисунок 1. Перегрузочные характеристики электродвигателей серии 4А различной мощности при температуре окружающей среды + 40 °С, вычисленные по (11) – (12) до кратностей перегрузки, соответствующих критическому току

(10) – (12) определяют защитную характеристику устройств защиты электродвигателей от перегрузки. При этом имеется еще запас времени на срабатывание защиты в связи с тем, что в действительности электродвигатели в сельском хозяйстве редко эксплуатируются при температуре окружающей среды + 40 °С.

Введем некоторые ограничения для защитной характеристики устройств защиты. Первое ограничение связано с реальными значениями кратности тока перегрузки. Обычно перегрузочные характеристики электродвигателей и защитные характеристики устройств защиты изображаются при кратностях тока перегрузки, соответствующих пусковым токам электродвигателей. В действительности же ток перегрузки, обусловленный перегрузкой момента на валу, изменяется до критического значения $i_{кр}$, после чего, в процессе остановки ротора, быстро увеличивается до пускового значения i_n (рис.2). Поэтому защитная характеристика электродвигателя должна быть ограничена значением кратности тока перегрузки $K_{пер.кр.}$.

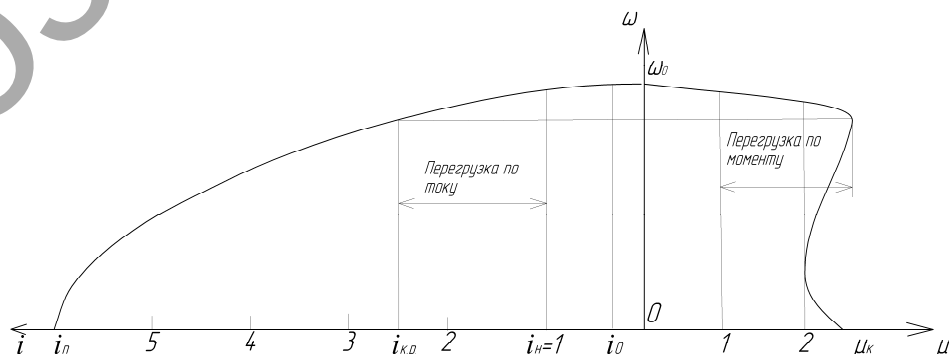


Рисунок 2. Механическая $\omega = f_1(\mu)$ и электромеханическая $\omega = f_2(i)$ характеристики трехфазного асинхронного электродвигателя: i – кратность тока, о.е.; μ – кратность момента, о.е.; ω – угловая скорость, рад/с

которое соответствует току $i_{кр}$ [6, с.19]:

$$i_{кр} = \sqrt{i_0^2 + (1 - i_0^2) \mu_k (\mu_k + \sqrt{\mu_k^2 - 1})}. \quad (13)$$

$$i_0 = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_n} - \frac{\cos \varphi_n}{\mu_k + \sqrt{\mu_k^2 - 1}}, \quad (14)$$

где μ_k – кратность критического (максимального) момента электродвигателя, о.е.;

$\cos \varphi_n$ – номинальный коэффициент мощности электродвигателя, о.е.;

$i_{кр}$ – ток электродвигателя при критическом скольжении, о.е.;

i_0 – ток холостого хода, о.е.

Второе ограничение защитной характеристики устройств защиты связано с допустимым временем пуска электродвигателя с холодного состояния и с допустимым временем нахождения электродвигателя в стопорном режиме при горячем состоянии обмоток.

Допустимое время пуска электродвигателя не может превышать допустимого времени нахождения электродвигателя под пусковым током с холодного состояния обмотки

$$t_{доп.пуск} \leq \frac{\theta_{доп.стоп} - 40}{v_t}, \quad (15)$$

где $\theta_{доп.стоп}$ – температура обмотки при срабатывании защиты по табл.1, °С;

v_t – скорость роста температуры, °С/с [5, с.66].

Допустимое время нахождения электродвигателя в стопорном режиме с горячего состояния

$$t_{доп.стоп} \leq \frac{\theta_{доп.стоп} - \theta_{доп.сп.}}{v_t}, \quad (16)$$

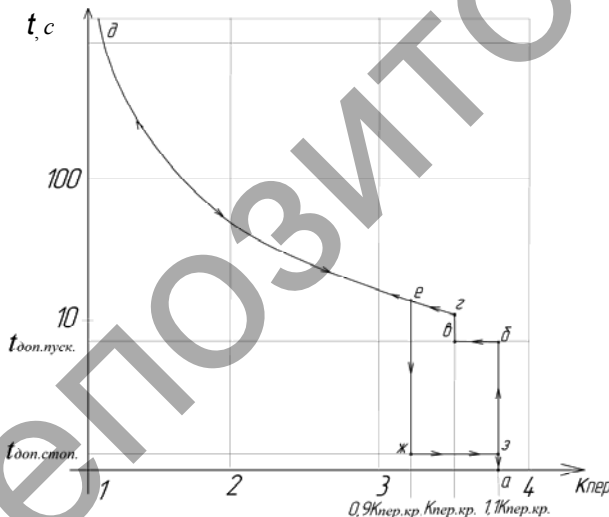


Рисунок 3. Защитная характеристика устройства защиты электродвигателя от перегрузки по току: а, б, в, г – пусковой участок; г, д – участок защиты от перегрузки; е, ж, з – участок защиты от стопорного режима в горячем состоянии

где $\theta_{доп.стоп}$ и $\theta_{доп.сп.}$ выбирали по табл. 1 и 2 с учетом класса нагревостойкости изоляции, °С.

С учетом принятых ограничений защитная характеристика устройства защиты имеет вид (рис.3).

Линия а,б,в,г соответствует пусковому участку защитной характеристики с холодного состояния, линия г,д – участку защиты от перегрузки, а линия е,ж,з,а – стопорному режиму с горячего состояния. Линия а,б соответствует увеличенному на 10% значению кратности критического тока, а линия е,ж – уменьшенному на 10% значению кратности критического тока.

Заключение

1. Для построения универсальных устройств защиты, рассчитанных для группы электродвигателей, подходит расчет перегрузочной характеристики электродвигателя по допустимой температуре нагрева.

2. Защитную характеристику устройства защиты электродвигателя от перегрузки по току рекомендуется определять по формуле: $t_{доп.} = C / (k_{пер}^2 - 1)$, где C – коэффициент, зависящий от номинальной плотности тока обмотки статора и приращения температуры при перегрузке.

3. Защитная характеристика устройства защиты от перегрузки по току ограничивается кратностью перегрузки, соответствующей критическому току, допустимым временем пуска электродвигателя с холодного состояния и допустимым временем пребывания в стопорном режиме с горячего состояния.

ЛИТЕРАТУРА

1. Славин, Р.М. Режимы работы и защиты автоматических установок животноводческих ферм/ Р.М. Славин. – Москва: Машиностроение, 1965. – 388 с.

2. Сыромятников, И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных электродвигателей/ И.А. Сыромятников; под ред. А.М. Мамиконянца. – 4-е изд. – Москва: Энергоатомиздат, 1984. – 240 с.

3. ГОСТ Р 51689 – 2000. Машины электрические вращающиеся. Двигатели асинхронные мощностью от 0,12 до 400 кВт включительно: гос. стандарт РФ. – Введен 01.01.2002. – Москва: Всероссийский институт стандартизации и сертификации в машиностроении Госстандарта России, 2002. – 15 с.

4. Кропачев, И.Г. Защитные устройства асинхронных электродвигателей малой мощности/ И.Г. Кропачев // Пром. Энергетика, 1983. – №10. – С. 27 – 32.

5. Асинхронные двигатели серии 4А: справочник/ А.Э. Кравчик и [др.]. – Москва: Энергоиздат, 1982. – 504 с.

6. Быстрицкий, Д.Н. Регулируемые асинхронные электродвигатели в сельскохозяйственном производстве/ Д.Н. Быстрицкий. – Москва: Энергия, 1975. – 400 с.