



АСИНХРОННЫЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ 0,4 КВ

Аварийные режимы работы

Михаил Соркин, ООО «Новатек-Электро», г. Санкт-Петербург

Асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором (далее по тексту – АД) обычно рассчитаны на срок службы 15–20 лет без капитального ремонта при условии их правильной эксплуатации [1, 2].

Под правильной эксплуатацией АД понимается его работа в соответствии с номинальными параметрами, указанными в паспортных данных электродвигателя. Однако в реальной жизни имеет место значительное отступление от номинальных режимов эксплуатации. Это в первую очередь связано с плохим качеством питающего напряжения и нарушением правил технической эксплуатации: технологические перегрузки, условия окружающей среды (повышенные влажность, температура), снижение сопротивления изоляции, нарушение охлаждения.

Последствием таких отклонений являются аварийные режимы работы АД. В результате аварий ежегодно выходят из строя до 10% применяемых электродвигателей. Например, 60% скважных электронасосных агрегатов выходят из строя чаще одного раза в году [3]. Выход из строя АД приводит к тяжелым авариям и большому материальному ущербу, связанному с простоем технологического оборудования, устранением последствий аварий и ремонтом вышедшего из строя электродвигателя. Простой ремонт электрической машины мощностью до 1 кВт обходится в 5–6 долларов США. Чтобы оценить, во что обойдется ремонт более мощной машины, надо просто умножить эту цифру на мощность двигателя. Помимо этого, работа в условиях, отличных от номинальных, ведет к повышенному энергопотреблению из сети, увеличению потребляемой реактивной мощности.

Совершенно очевидно, что применение надежной и эффективной защиты от аварийных режимов работы значительно сократит количество и частоту аварийных ситуаций и продлит срок службы АД, сократит расход электроэнергии и эксплуатационные расходы. Но для того чтобы выбрать эту защиту, необходимо знать, как и от чего необходимо защищать АД, а также специфику процессов, протекающих в нем в случае аварий.

АВАРИЙНЫЕ РЕЖИМЫ МЕХАНИЧЕСКИЕ АВАРИИ АД К таким авариям относятся:

- деформация или поломка вала ротора;
- ослабление крепления сердечника статора к станине;

- ослабление опрессовки сердечника ротора;
- выплавление баббита в подшипниках скольжения;
- разрушение сепаратора, кольца или шарика в подшипниках качения;
- поломка крыльчатки, отложение пыли и грязи в подвижных элементах и пр.

Причиной большинства механических аварий являются радиальные вибрации из-за асимметрии питающей сети (т. н. перекос фаз), механические перегрузки на валу электродвигателя, брак комплектующих элементов или допущенный при сборке. До 10% всех аварий АД имеют механическое происхождение. При этом 8% приходится на долю аварий, связанных с асимметрией фаз и только 2% на аварии, связанные с механическим перегрузом. Доля аварий, связанных с браком, мала, и поэтому ее можно не принимать во внимание при настоящем рассмотрении. Оценка вероятностей возникновения механических аварий отсутствует, большая их часть носит скрытый характер и выявляется только после соответствующих испытаний или разборки двигателя. Однако постоянный контроль сетевого напряжения и нагрузки на валу АД позволяет в большинстве случаев свести эту вероятность к минимуму.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АВАРИИ АД

Они в свою очередь делятся на три типа:

- сетевые аварии, связанные с авариями в питающей электросети (повышение-понижение напряжения, частоты);
- токовые аварии, связанные с обрывом проводников в обмотках статора, ротора или кабеля, межвитковым и междуфазным замыканием обмоток, нарушением контактов и разрушением соединений, выполненных пайкой или сваркой; аварии, приводящие к пробое изоляции в результате нагрева, вызванного протеканием токов перегруза или короткого замыкания;
- аварии, связанные со снижением сопротивления изоляции вследствие ее старения, разрушения или увлажнения.

СЕТЕВЫЕ АВАРИИ «ПО ГОСТ»

Качество электроэнергии на территории РФ определяет ГОСТ 13109-97 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения» [4]. ГОСТ определяет соответствие стандартам целого ряда показателей, в первую очередь таких, как отклонения напряжения и частоты, коэффициент гармонической составляющей четного и нечетного порядка, коэффициенты обратной и нулевой последовательности напряжения и пр. Из-за аварий на питающих подстанциях, КЗ в распределительных сетях, коммутационных и грозовых возмущений, неравномерности распределения нагрузки по фазам, фактические значения ряда показателей больше допустимых, что ведет к аварийным режимам работы АД. По статистическим данным, до 80% аварий

электродвигателя напрямую или косвенно связаны именно с авариями сетевого напряжения [3]. Анализ показателей качества электрической энергии (ПКЭ) относительно условий работы АД показывает, что, например, при уменьшении напряжения в сети возрастает ток статора, что ведет к интенсивному нагреву изоляции АД и сокращению срока службы вследствие ускоренного старения изоляции. Повышение напряжения приводит к увеличению магнитного потока статора, тока намагничивания, нагреву сердечника (вплоть до «пожара» в стали), росту потребляемой из сети реактивной мощности. В таблице 1 приведены обобщенные данные о влиянии основных показателей качества электрической энергии на режимы работы асинхронных двигателей.

СЕТЕВЫЕ АВАРИИ «ВНЕ ГОСТ»

Следует отметить, что существует еще несколько типов сетевых аварий, которые происходят наиболее часто, но напрямую ГОСТом не регламентируются, т. к. являются крайними случаями проявления несимметричных режимов работы АД. Это обрыв одной из фаз, нарушение последовательности фаз и «слипание» фаз. Обрыв фаз, как правило, связан с обрывом жилы питающего кабеля, сгоревшим предохранителем, или отключением автомата в одной из линий, или обрывом самой линии. При соединении обмоток двигателя звездой напряжение в двух фазах делится поровну и составляет половину линейного $U_{\phi} = U_{л} / 2$, а в третьей отсутствует. Такие режимы приводят к повышенному энергопотреблению из сети, перегреву обмоток статора. Поле из вращающегося превращается в пульсирующее, ток в оборванной фазе будет отсутствовать, в двух других увеличится на 50%. Двигатель не разворачивается даже на холостом ходу. В некоторых типах двигателей в случае, если обрыв произошел во время работы двигателя, на оборванной фазе генерируется т. н. напряжение «рекуперации», близкое по фазе и амплитуде к сетевому. Двигатель переходит в тормозной режим работы и, если его не отключить, сгорает в течение нескольких минут. Аварийный режим «слипания» фаз происходит в случае обрыва одной из питающих фаз и замыкании ее со стороны двигателя на другую фазу. При этом одно и то же фазное напряжение подается на две фазы двигателя, на третьей остается в норме. При незначительной амплитудной несимметрии наблюдается значительная фазная несимметрия, приводящая к появлению значительных напряжений обратной последовательности, вызывающих перегрев двигателя и выход его из строя. Нарушение закрепленной ГОСТом последовательности фаз А-В-С (В-С-А, С-А-В) на любую другую обуславливает реверсивный режим работы – вращение двигателя в другую сторону, что часто недопустимо по условиям технологического процесса, т. к. вызывает вращение приводного механизма в обратную сторону и может привести, помимо аварии

самого двигателя, к тяжелым, порой катастрофическим, последствиям. Постоянный контроль наличия и качества сетевого напряжения, включая гармонический анализ, вычисление действующих или средних значений напряжения до включения двигателя, контроль за его состоянием во время работы АД, в т. ч. за изменениями параметров фазных напряжений, вызванными режимами работы самого двигателя, позволяет избежать возникновения аварийных режимов, предотвратить появление режимов короткого замыкания и токовой перегрузки.

ТОКОВЫЕ АВАРИИ АД

Напряжение на зажимах АД и фазные токи, протекающие по его обмоткам, тесно взаимосвязаны и любые, даже небольшие, изменения сетевого напряжения вызывают изменения фазных токов (см. табл. 1). Для эффективной защиты АД необходимо измерять фазные токи как можно точнее. Согласно последним исследованиям, длительная работа двигателя с токовым перегрузом всего лишь на 5% от номинального сокращает срок его службы в 10 раз [5]. В связи с сильной несинусоидальностью кривой тока, особенно во время пусков, в ней присутствует большое количество гармоник высшего порядка, оказывающих существенное влияние на величину действующего значения тока.

Таблица 1. Влияние отклонений ПКЭ на работу АД

Вид ПКЭ	Условное обозначение	Предельно допустимые нормы	Характер изменения ПКЭ, изменения в работе АД

<p>фазной системе (перекос фаз) – см. рис. 2</p>	<p>Коэфф. нулевой послед. U</p>	<p>K_{0U}</p>	<p>4%</p>	<p>вращающихся встречно вращению ротора. Вращающееся магнитное поле из кругового превращается в эллиптическое, что приводит к радиальным вибрациям и разрушениям подшипников, обмоток. Приводит к токовому перекосу и сильному нагреву. Длительная работа на пределах коэффициентов при нагрузке меньше номинальной снижает срок службы на 10–15%, при номинальной нагрузке – вдвое. Если перекос составляет 50%, срок службы снижается в 5–10 раз.</p>
<p>Несинусоидальность напряжения – см. рис. 3</p>	<p>Коэфф. искажения синусоидальности U</p>	<p>K_U</p>	<p>12%</p>	<p>Влияет на состояние изоляции обмоток, приводит к их пробоею на корпус. Возрастают суммарные потери электрической энергии. При $K_U = 10\%$ суммарные потери возрастают на 10–15%. Возрастает количество гармоник обратной последовательности, снижается коэффициент мощности.</p>

Коэфф.
n-й
гармо-
ники,
состав-
ляющей
U

$K_{u(n)}$

№ n гарм.	Знач. %
2	3
3	3,75
4	1,5
5	9
6	0,75
7	7,5
8	0,75
9	1,13
10	0,75

Превышение допустимых значений коэффициентов 2, 5 и 8-й гармоник ведет к значительному росту напряжения обратной последовательности, что приводит к перегреву двигателя и быстрому выходу его из строя, возникновению обратновращающихся магнитных полей, создающих паразитные моменты, ухудшающие механическую характеристику. Превышение допустимых значений гармоник кратным трем – 3 и 9-й – приводит к росту напряжения нулевой последовательности, что вызывает асимметрию напряжений по фазам. При асимметрии больше 15% рабочий и пусковой момент снижается на 25%, растет потребление из сети реактивной мощности на 3–7%. Рост допустимых значений гармоник прямой последовательности 4 и 7-й приводит к росту активного сопротивления ротора и ухудшению механической характеристики.

Рис. 1. Отклонения напряжения

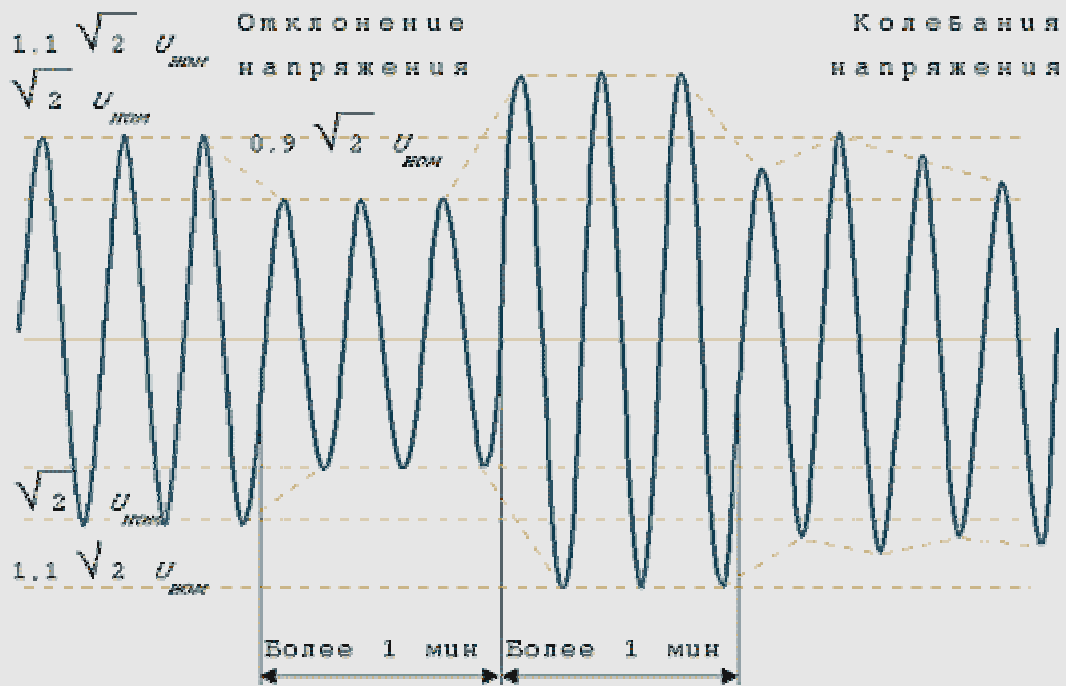


Рис. 2. Несимметрия напряжений

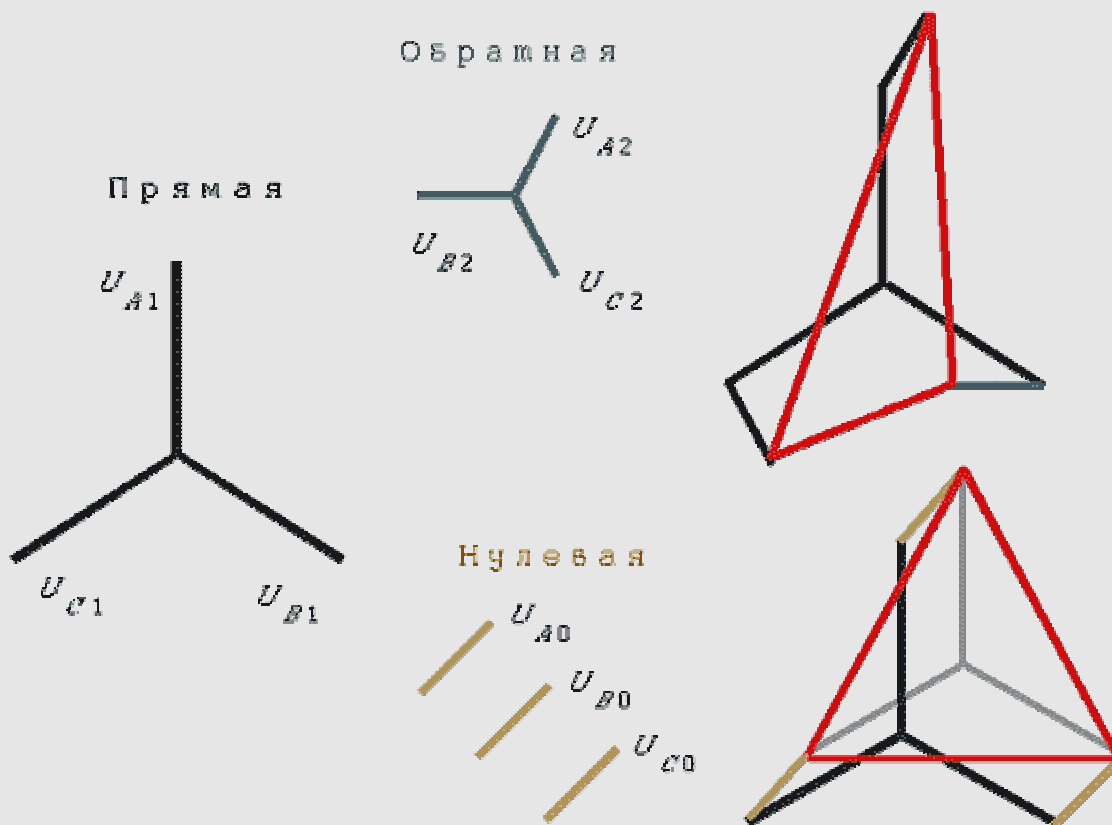
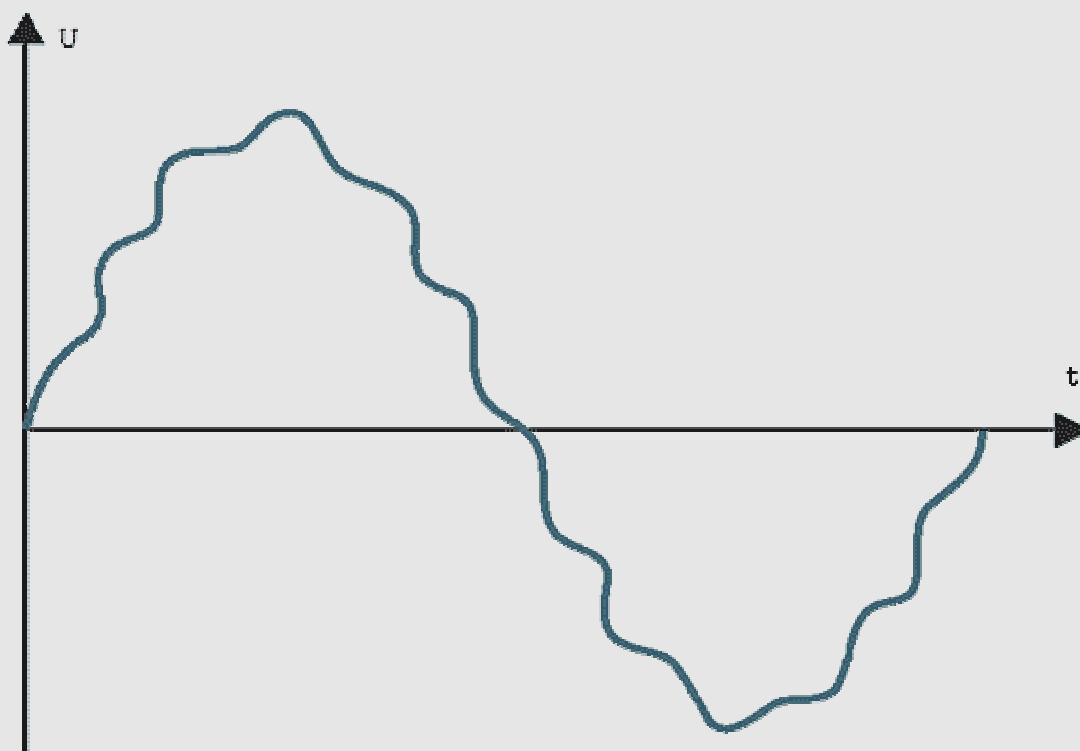


Рис. 3. Несинусоидальность напряжения



Поэтому, если принимать решение о работе АД не по вычисленным действующим значениям тока, а по неким усредненным сигналам или, что еще хуже, по пиковым значениям, это может привести к ложным выводам о наличии или отсутствии токового перегруза.

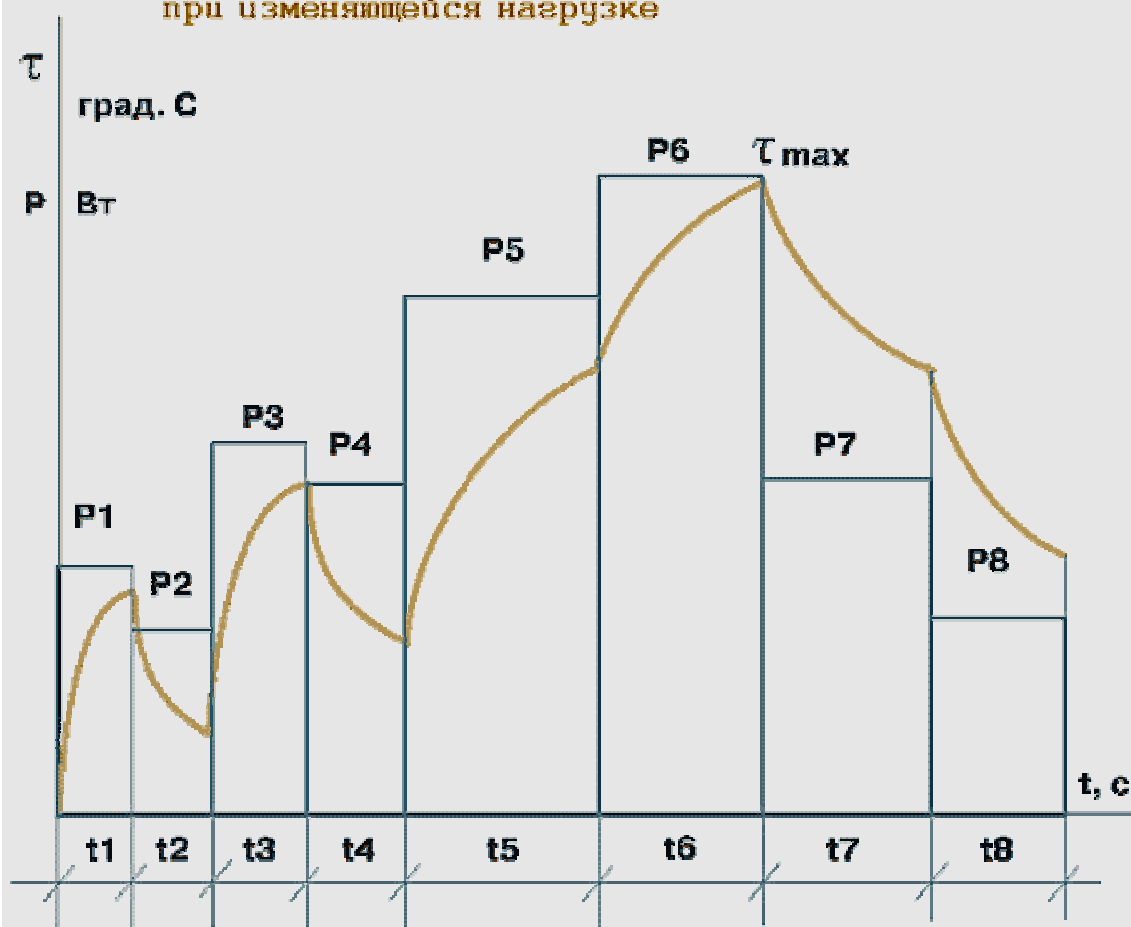
Различают два вида токового перегруза АД: симметричный и несимметричный. Симметричный токовый перегруз, как правило, связан с механическими перегрузками на валу двигателя. Их значение напрямую связано с режимами работы АД и тепловым перегрузом, о которых речь пойдет ниже. Большая часть токовых аварий АД связана в первую очередь с повреждениями внутри самого двигателя, приводящими к несимметричному токовому перегрузу. Рассмотрим основные виды таких аварий (табл. 2). Во всех случаях внутренних аварий электродвигателя наблюдается значительная асимметрия фазных токов, превышающая в несколько раз асимметрию напряжений. Поэтому постоянный контроль токов, соотношения токового перекоса с перекосом напряжений, позволяет делать достаточно достоверные выводы о наличии таких аварий и оперативно отключать двигатель.

Таблица 2. Влияние внутренних повреждений на работу АД

Вид аварии	Изменение	Характер изменений в работе двигателя
------------	-----------	---------------------------------------

	ТОКОВ		
	Соединение обмотки звездой	Ток в оборванной фазе отсутствует. В двух других $I = 1,5 I_{\text{ном}}$	Двигатель гудит и не разворачивается даже на х.х. Поле из вращающегося превращается в пульсирующее. В работающем двигателе при нагрузке равной 1/2 номинальной, рабочие токи увеличиваются на 15–20%, скорость вращения снижается незначительно. В случае больших нагрузок двигатель остановится и, если не сработает защита, быстро выйдет из строя.
Обрыв одной фазы в обмотке статора	Соединение обмотки треугольником	Ток в оборванной фазе отсутствует. В двух других значительно больше номинального.	Обмотки подключены к сети по схеме открытого треугольника. Токи, протекающие по обмоткам статора, создают вращающее магнитное поле, двигатель хорошо берет с места и развивает нормальную скорость. Энергопотребление из сети значительно больше, чем в нормальном режиме. Момент близок к номинальному, но при сильном нагреве двух рабочих обмоток $I_{\text{л}}$ в одном из питающих проводов будет в $3 = 1,7$ раза больше, чем в двух других.
Межвитковые замыкания в фазе обмоток статора	$I_{\text{ф}}$, подходящий к поврежденной фазе, возрастает во много раз (его величина определяется количеством замкнутых витков).		Двигатель начинает необычно гудеть, а если работает под нагрузкой, вращается с пониженной скоростью. Через некоторое время двигатель начинает гореть.
Междуфазные замыкания обмоток статора	Приводят к протеканию по обмоткам сети токов короткого замыкания, в 10–100 раз превышающих номинальные токи.		Обмотки статора быстро нагреваются и, если не сработает защита, перегреваются и сгорают.

■ Рис. 4. Кривая изменения температуры двигателя при изменяющейся нагрузке



ТЕПЛОВАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА АД

В зависимости от характера изменения нагрузки различают четыре основных номинальных режима работы АД: продолжительный, кратковременный, повторно-кратковременный и смешанный. Не будем подробно останавливаться на описании этих режимов, заметим только, что основной характеристикой нагрузочных режимов является тепловая характеристика электродвигателя.

Работа АД всегда сопровождается его нагревом, что обусловлено происходящими в нем процессами и потерями энергии. Нормативный срок службы электродвигателя определяется в конечном счете допустимой температурой нагрева его изоляции. В современных двигателях применяется несколько классов изоляции, допустимая температура

температура	нагрева	которых	составляет:
—	для	класса	A — 105°C,
E	—	—	120°C,
B	—	—	130°C,
F	—	—	155°C,
H	—	—	180°C,

С — выше 180°C.

Превышение допустимой температуры ведет к преждевременному разрушению изоляции и существенному сокращению срока его службы. В эксплуатации в основном приходится сталкиваться с режимами, ненормированными ГОСТами. Наиболее характерным является режим с быстроизменяющейся нагрузкой, когда двигатель периодически входит в режим перегрузки, возвращаясь затем на номинальный режим или опускаясь в режим работы с нагрузкой меньше номинальной.

Если машина работает в продолжительном режиме, но с переменной нагрузкой (P1, P2, P3...), имеет место неустановившийся тепловой процесс (см. рис. 4), т. к. в разные промежутки времени: t1, t2, t3, t4 и т. д. в ней возникают различные потери мощности, а следовательно, различные тепловые потери. Для эффективного контроля количества тепла, накопленного двигателем в процессе работы, необходимо выяснить законы нагрева и охлаждения асинхронного электродвигателя.

УРАВНЕНИЕ ТЕПЛОВОГО БАЛАНСА АД

В связи с трудностью проведения такого анализа, принимаются следующие допущения: двигатель рассматривается как однородное тело, имеющее бесконечно большую теплопроводность и одинаковую температуру во всех своих точках. Теплоемкость двигателя и его коэффициент теплоотдачи не зависят от нагрузки на валу двигателя. Температура двигателя зависит не только от нагрузки, но и от температуры окружающей среды. Средняя температура t пропорциональна количеству тепла Q , накопленному двигателем:

$$\tau = \frac{Q}{C}, \quad (1)$$

где C — теплоемкость двигателя.

Потери тепла двигателем пропорциональны его температуре:

$$dQ/dt = -A \cdot \tau = -A \cdot Q/C, \quad (2)$$

где A — теплоотдача двигателя.

Если предположить, что до включения двигатель был холодным, основное тепловое уравнение при работе двигателя можно записать в виде:

$$dQ/dt = -A \cdot Q/C + I^2 \cdot R, \quad (3)$$

где $I^2 \cdot R$ — мощность потерь, выделяемая в двигателе при протекании тока I по обмоткам с активным сопротивлением R .

Решение уравнения (3) при постоянном токе I :

$$Q(t) = Q_0 \cdot (1 - e^{-t \cdot A/C}), \quad (4)$$

где $Q_0 = I^2 \cdot R \cdot C/A$, установившееся количество тепла в двигателе при $dQ/dt = 0$.

Предельно допустимому току двигателя $I_{ном}$ соответствует предельно допустимое количество тепла

$$Q_{ном} = I_{2ном} \cdot R \cdot C/A \quad (5)$$

и предельно допустимая температура (относительно окружающей среды)

$$t_{ном} = Q_{ном} / C = I_{2ном} \cdot R/A \quad (6)$$

При включении двигателя на постоянном токе, в N раз превышающем $I_{ном}$, время выхода на предельно допустимое количество тепла $Q_{ном}$

$$T_N = \{ I_n N^2 - I_n \cdot (N^2 - 1) \} / (A/C) \quad (7)$$

Псевдотепловые математические модели электродвигателей положены в основу большинства защит АД от теплового перегруза. Постоянный расчет I_2 с учетом скорости нагрева и остывания двигателя при как можно большей степени дискретизации измерений дает наиболее полную картину о количестве тепла, накопленного двигателем и опасного с точки зрения допустимого нагрева изоляции. При его превышении происходит так называемое ускоренное старение изоляции: снижается механическая прочность, появляются хрупкость, разломы и трещины, что приводит к снижению электрической прочности и пробоя.

СНИЖЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ

В процессе эксплуатации АД его изоляция неизбежно стареет. Основными причинами, вызывающими эти процессы, являются:

- нагревание обмоток рабочими и пусковыми токами, токами короткого замыкания и перегруза, теплотой от посторонних источников;
- динамические усилия, возникающие при взаимодействии проводников с током;
- коммутационные перенапряжения.

Большое влияние оказывают также условия окружающей среды: температура и влажность воздуха, загрязненность и запыленность. Состояние изоляции определяет степень безопасной эксплуатации электроустановок. Эксплуатация электродвигателя допускается, если сопротивление его изоляции на корпус не менее 0,5 МОм. Вероятность пробоя изоляции возрастает на порядок, если сопротивление изоляции в два раза меньше допустимого. При снижении сопротивления изоляции высока вероятность появления такой тяжелой аварии АД, как пробой обмотки статора на корпус (короткое замыкание на корпус), опасной не только для самого электродвигателя, но и для обслуживающего персонала. По сети начинают протекать токи короткого замыкания, в 10–100 раз превышающие номинальные, а на корпус электроустановки может быть вынесено высокое напряжение, опасное для жизни человека. Не менее важным является непрерывный контроль сопротивления изоляции обмоток статора во время работы электродвигателя, т. к. диэлектрические свойства изоляции, измеренные до включения АД, могут внезапно измениться под воздействием электрического напряжения и температуры. Для этого используется измерение тока утечки на землю с помощью дифференциального трансформатора тока, реагирующего на

появление дифференциального (разностного) тока выше некоторой уставки, заданной пользователем.

МЕТОДЫ ЗАЩИТЫ ОТ АВАРИЙНЫХ РЕЖИМОВ

Стремясь защитить двигатели от аварийных режимов, еще с середины прошлого века в энергетике стали применять различную релейную защиту: тепловую, токовую, температурную, фильтровую и комбинированную.

Многолетний опыт эксплуатации АД показал [6], что большинство существующих защит не обеспечивает безаварийную работу АД. Так, например, тепловые реле рассчитывают на длительную перегрузку 25–30% от номинальной. Но чаще всего они срабатывают при обрыве одной фазы при нагрузке 60% от номинальной. При меньшей нагрузке реле не срабатывает и АД продолжает работать на двух фазах и выходит из строя в результате перегрева изоляции обмоток. Правильный выбор защитного устройства – это важный фактор в обеспечении безопасной эксплуатации АД.

Приборы защиты АД от аварийных режимов можно разделить на несколько видов:

- а) тепловые защитные устройства: тепловые реле, расцепители;
- б) защитные устройства от свехтоков: плавкие предохранители, автоматы;
- в) термочувствительные защитные устройства: термисторы, термостаты;
- г) защита от аварий в электросети: реле напряжения и контроля фаз, мониторы сети;
- д) приборы МТЗ (максимальной токовой защиты), электронные токовые реле;
- е) комбинированные устройства защиты.

Во второй части нашей статьи, которая будет опубликована в следующем номере журнала, мы подробнее опишем принципы действия, достоинства и недостатки существующих защит, а также результаты попыток создания универсальных защитных устройств АД.

Литература

1. Паначевный Б. И. Курс электротехники. – Харьков: Торсинг. – Ростов-на-Дону: Феникс. – 2002.
2. Кацман М. М. Электрические машины. – Москва: Высшая школа, 2000.
3. Материалы научно-практической конференции по эксплуатации и совершенствованию приборов релейной защиты и автоматики. – Днепропетровск, 1997.
4. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
5. Данилов И. А., Иванов П. М. Общая электротехника с основами электроники. – Москва: Высшая школа, 2000.
6. Грундулис А. О. Защита электродвигателей в сельском хозяйстве. – Москва: Агропромиздат, 1988.