

АНАЛИЗ АВАРИЙНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ К ВОПРОСУ ВЫБОРА ИХ ЭФФЕКТИВНОЙ ЗАЩИТЫ

О.Ю. Кондратюк, А.Б. Егоров

(Украинская инженерно-педагогическая академия, Харьков)

Проанализированы различные виды аварийной работы асинхронных электродвигателей с целью определения эффективных и надежных методов их защиты.

аварийные режимы, асинхронные двигатели, эффективная защита

Благодаря простоте конструкции, высокой надежности и невысокой стоимости асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором (далее по тексту АД), является наиболее распространенным электродвигателем. Свыше 85% всех электрических машин – это трехфазные асинхронные электродвигатели.

АД обычно рассчитаны на срок службы 15 – 20 лет без капитального ремонта, при условии их правильной эксплуатации. 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, плохое качество питающего напряжения и нарушение 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, ломаются чаще одного раза в году [2]. Выход из строя АД приводит к тяжелым авариям и большому материальному ущербу, связанному с простоем технологических процессов, устранением последствий аварий и ремонтом вышедшего из строя электродвигателя. Помимо этого, работа на аварийных режимах 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.

Аварии АД. Аварии АД подразделяются на два основных типа: механические и электрические. Механические аварии это: деформация или поломка вала ротора, ослабление крепление 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, 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 в 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, в свою очередь, делятся на три типа:

- сетевые аварии (аварии по напряжению), связанные с авариями в питающей электросети;
- токовые аварии, связанные с обрывом проводников в обмотках статора, ротора, или кабеля, межвитковое и междуфазное замыкание обмоток, нарушением контактов и разрушении 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 АД. Качество электроэнергии определяет ГОСТ 13109-97 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения» [1]. 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, пр. Из-за аварий на подающих 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.

Анализ показателей качества электрической энергии (ПКЭ) относительно условий работы АД показывает, что, например, при уменьшении напряжения в сети, возрастает ток статора, приводящий к интенсивному нагреву изоляции АД и сокращению срока службы вследствие ускоренного старения изоляции и ее пробоя, а повышение напряжения приводит к увеличению магнитного потока статора, тока намагничивания, нагреву сердечника (вплоть до «пожара» в стали), потребляемой из сети реактивной мощности, снижающей коэффициент мощности. В табл. 1 приведены обобщенные данные о влиянии основных показателей качества электрической энергии на режимы работы АД.

Таблица 1

Влияние отклонений ПКЭ на работу АД

Вид ПКЭ	Характер изменения ПКЭ, изменения в работе АД	
	Снижение на 10% от U_n	Превышение на 10% от U_n
Отклонение напряжения	Момент двигателя снижается на 19%. Температура повышается на 7 °С. Увеличивается время пуска. Скольжение повышается на 27,5%, ток ротора – на 14%, ток статора – на 10%	Увеличенный момент двигателя служит причиной перегрузки валов, ременных передач, увеличивается пусковой удар. Пусковой ток повышается на 12%, вращающий момент на 21%, коэффициент мощности снижается на 5%
Несимметрия напряжений в 3-фазной системе (перекос фаз)	Недопустимый перекас напряжений по фазам вызывает те же процессы, что и при отклонении напряжений. Длительная работа в пределах коэффициентов при нагрузке меньше номинальной снижает срок службы на 10 – 15%, при номинальной нагрузке – вдвое. Если перекас составляет 50%, срок службы снижается в 5 – 10 раз.	
Несинусоидальность напряжения	При коэффициенте несинусоидальности 10%, суммарные потери возрастают на 10 – 15%. Возрастает число гармоник обратной последовательности, снижается коэффициент мощности. Превышение допустимых значений коэффициентов 2, 5 и 8 гармоник ведет к значительному росту напряжения обратной последовательности, приводящих к перегреву двигателя и быстрому выходу его из строя, возникновению обратновращающихся магнитных полей, создающих паразитные моменты, ухудшающие механическую характеристику. Превышение допустимых значений гармоник кратным 3: 3 и 9 приводит к росту напряжения нулевой последовательности, вызывающих 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 приводит к росту активного сопротивления ротора и ухудшению механической характеристики.	

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 $U_{\phi} = U_{л} / 2$, 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.

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.

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 вызванных режимами работы самого двигателя, позволяют, зачастую, избежать причин возникновения аварийных режимов, предотвратить появление режимов короткого замыкания и токового перегруза.

Токовые аварии АД. Напряжения на зажимах АД и фазные токи, протекающие по его обмоткам тесно взаимосвязаны и любые, даже небольшие, изменения сетевого напряжения вызывают значительные 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. 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. Поэтому, если принимать решение о работе АД не по вычисленным действующим значениям тока, а по неким усредненным сигналам или, 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).

Таблица 2

Влияние внутренних повреждений на работу АД

Вид аварии	Изменение токов		Характер изменений в работе двигателя
Обрыв 1 фазы в обмотке статора	Соединение обмотки звездой	Ток в оборванной фазе отсутствует. В двух других $I = 1,5 I_n$	Двигатель не разворачивается даже на х.х. Поле из вращающегося превращается в пульсирующее. В работающем двигателе при нагрузке = 1/2 номинальной, рабочие токи увеличатся на 15 – 20%, частота снижается незначительно.
	Соединение обмотки треугольником	Ток в оборванной фазе отсутствует. В двух других значительно больше номинального.	Момент близок к номинальному, но при сильном нагреве двух рабочих обмоток. I_{Δ} в одном из питающих проводов будет в $\sqrt{3} = 1,7$ раз больше, чем в двух других.
Межвитковые замыкания в фазе обмоток статора	$I_{ф}$, подходящий к поврежденной фазе возрастает во много раз (его величина определяется количеством закороченных витков).		Двигатель вращается с пониженной скоростью.
Междуфазные замыкания обмоток статора	Приводят к протеканию по обмоткам, сети токов короткого замыкания, в 10 – 100 раз превышающих номинальные токи		Обмотки статора быстро нагреваются.

Во всех случаях внутренних аварий электродвигателя наблюдается значительная асимметрия фазных токов, превышающая в несколько раз асимметрию напряжений. Поэтому постоянный контроль токов, соотношение токового перекаса с перекасом напряжений, позволяют принимать достаточно достоверные выводы о наличии таких аварий и оперативно отключать двигатель.

Режимы работы 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 [3]. Работа АД всегда со-

проводится 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 нагрева которых составляет для класса А – 105 °С, Е – 120 °С, В – 130 °С, F – 155 °С, Н – 180 °С, С свыше 180 °С. 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. 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 пропорциональна количеству тепла Q , накопленному двигателем

$$t = Q / C, \quad (1)$$

где C – теплоемкость двигателя.

Потери тепла двигателем пропорциональны его температуре

$$dQ / dt = -A * t = -A * Q / C, \quad (2)$$

где A – теплоотдача двигателя. Если предположить, что до включения двигателя был холодным основное тепловое уравнение при работе двигателя можно записать в виде

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

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

Решение уравнения (3) при постоянном токе I

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

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

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

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

и предельно допустимая температура (относительно окружающей среды)

$$t_{\text{ном}} = Q_{\text{ном}}/C = I_{\text{ном}}^2 * R/A. \quad (6)$$

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

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

Тепловые математические модели электродвигателей положены в основу большинства защит АД от теплового перегруза [4]. Постоянный расчет I^2 с учетом скорости нагрева и остывания двигателя при, как можно большей степени дискретизации измерений, дают наиболее полную картину о количестве тепла, накопленного двигателем и опасному, с точки зрения допустимого нагрева изоляции. При превышении допустимого нагрева для данного класса изоляции происходит так называемое ускоренное «старение» изоляции: снижается механическая прочность, появляется хрупкость, разломы и трещины, что приводит к снижению ее 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; динамическими усилиями, возникающими при взаимодействии проводников с током, коммутационными перенапряжениями. На состояние изоляции большое влияние оказывают также условия окружающей среды – температура и влажность воздуха, загрязненность и запыленность.

Состояние изоляции определяет степень безопасной эксплуатации электроустановок. Электродвигатель допускается эксплуатировать, 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 тяжелейшей 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, что большинство существующих защит не обеспечивают 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 [5]. 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) токозависимые защитные устройства: 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.

Их выбор необходимо проводить исходя из особенностей режимов работы асинхронного двигателя, возможности возникновения аварийной ситуации и последствий, которые проявляются после.

ЛИТЕРАТУРА

1. *ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.*
2. *Грундулис А.О. Защита электродвигателей в сельском хозяйстве. – М.: Агропромиздат, 1988. – 288 с.*
3. *Кацман М.М. Электрические машины. – М.: Высш. шк., 2000. – 324 с.*
4. *Брускин А.Э. и др. Электрические машины и микромашины. – М.: Высш. шк., 2001. – 426 с.*
5. *Данилов И.А., Иванов П.М. Общая электротехника с основами электроники. – М.: Высш. шк., 2000. – 402 с.*

Поступила 1.04.2006

Рецензент: доктор технических наук, профессор С.Ф. Артюх,
Украинская инженерно-педагогическая академия, Харьков.