

А.И.Белошистов, А.В.Савицкий

## АНАЛИЗ АНОМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ И ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ ИХ ЗАЩИТЫ

*Параметры микропроцессорной системы защиты от аварийных режимов электродвигателей шахтных распределительных сетей.*

*К л ю ч е в ы е с л о в а: электродвигатель, режим работы, защита от аварийных режимов, выбор параметров*

**Постановка проблемы.** Работы по созданию эффективной защиты асинхронных двигателей (АД) проводятся как у нас в стране, так и за рубежом, однако проблема разработки такой защиты остается актуальной. Обусловлено это тем, что появляются АД повышенной мощности с уменьшенными габаритными размерами и увеличенными значениями крутящего момента, имеющие тепловую модель, отличающуюся от моделей ранее выпускаемых АД. Применяемые в настоящее время защиты не в полной мере отвечают этим вновь предъявляемым требованиям.

**Анализ публикаций и исследований.** В основу работы большинства отечественных устройств защиты, встраиваемых в пусковую взрывозащищенную аппаратуру, положен контроль параметров двигателей по действующему значению силы фазовых токов. Несмотря на различие схемных и конструктивных особенностей, их работа основана на измерении силы тока АД, его преобразовании и контроле напряжения заряда RC-цепи, пропорционального силе тока.

Схему измерения и подачи сигнала на отключение перегруженного АД на указанном принципе действия выполнить с достаточной степенью точности не представляется возможным. Обусловлено это тем, что при защите от технологических перегрузок АД в пределах 5...20 % требуются выдержки времени, исчисляемые десятками минут. Реализация таких выдержек требует установки в измерительных RC-цепях резисторов с сопротивлением около сотен килоом и конденсаторов емкостью в сотни микрофарад. На практике реализовать такие схемы с заданной точностью измерения невозможно.

В последние годы УкрНИИВЭ разработал ряд защит, базирующихся на применении микропроцессорной техники [1]. Опыт эксплуатации этих устройств показал перспективность развития данного направления. Но

предложенные устройства еще не в полной мере оправдывают возлагаемые на них ожидания.

Задача создания эффективной защиты сложная и требует всестороннего анализа возможных режимов работы, аварийных ситуаций и их последствий для защищаемого объекта. В настоящее время существует ряд аппаратов защиты АД общепромышленного применения [2,3], имеющих более расширенный спектр защитных функций, выполненных на базе микропроцессорной техники и предназначенных в основном для защиты конкретных установок подъемной и бытовой техники. Для нужд горнодобывающей промышленности устройства защиты такого типа ранее не разрабатывались.

**Цель статьи.** Анализ аномальных режимов работы АД, их последствий и разработка алгоритма работы устройств, позволяющих осуществлять защиту АД от этих режимов в полном объеме.

**Результаты исследований.** Применение устройств защиты, обладающих способностью анализировать вид аварии, контролировать состояние питающей сети и запоминать историю предыдущей работы АД, способствовало бы существенному продлению межремонтного периода и увеличению срока эксплуатации АД. Для решения этой задачи необходимо, прежде всего, проанализировать работу АД при возможных отклонениях его параметров, связанных с изменением условий работы.

Анализ работы АД и их пусковых характеристик, которые должны быть положены в основу алгоритма работы защиты, проводился на основании известных выражений [4]. Пуск АД характеризуется:

- а) силой пускового тока  $I_{In}$  или его кратностью  $I_{In} / I_{ном}$ ;
- б) значением пускового момента  $M_n$  или его кратностью  $M_n / M$ ;
- в) продолжительностью пуска.

Данные процессы АД имеют следующее математическое описание [4]:

- а) начальный пусковой ток:

$$I_{In} = U_{Iном} / \sqrt{r_{к.л}'^2 + x_{к.л}'^2},$$

где  $U_{Iном}$  – номинальное напряжение сети;

$r_{к.л}'^2$  – активное сопротивление короткого замыкания (КЗ) при пуске (при скольжении  $s = 1$ );

$x_{к.л}'^2$  – индуктивное сопротивление КЗ для начального пускового режима ( $s = 1$ );

- б) номинальная сила тока:

$$I_{1n} = \frac{P_{ном}}{m_1 \cdot U_{1ном} \cdot \eta' \cdot \cos \varphi'_{1ном}},$$

где  $\eta'$  – коэффициент полезного действия (КПД) в номинальном режиме;

$\cos \varphi'_{1ном}$  – коэффициент мощности в номинальном режиме;

$P_{ном}$  – номинальная мощность;

в) начальный пусковой момент:

$$M_n = \frac{p \cdot m_1 \cdot U_{1ном}^2 \cdot r'_{2П}}{2 \cdot П \cdot f_1 \cdot (r'_{к.л}{}^2 + x'_{к.л}{}^2)},$$

где  $r'_{2П}$  – активное сопротивление обмотки ротора при пуске;

$f_1$  – частота тока;

$m_1$  – число фаз обмотки статора;

$p$  – число полюсов;

г) электромагнитный момент:

$$M = 95,5 \cdot P_{ЭМ} / n_2;$$

$$P_{ЭМ} = P_1 - P_M - P_{Э1},$$

где  $n_2$  – частота вращения ротора;

$P_{ЭМ}$  – электромагнитная мощность;

$P_1$  – мощность, подводимая из сети;

$P_{Э1}$  – основные потери в статоре;

$P_M$  – основные магнитные потери в АД.

Анализируя приведенные формулы, можно сделать вывод, что качество напряжения питающей сети является одним из основных параметров, влияющих на работу АД. При снижении напряжения уменьшается сила пускового тока, что благоприятно влияет на пусковые характеристики АД, но одновременно уменьшается его пусковой момент. Снижение пускового момента приводит к увеличению продолжительности пуска и возможности перехода АД в режим заторможенного двигателя. Качество напряжения сети зависит от амплитуды напряжения каждой фазы, частоты тока, угла и продолжительности любых отклонений от номинальных значений. Отклонение одного или нескольких факторов от номинального значения могут существенно повлиять на срок службы АД. К таким неблагоприятным факторам относятся:

а) понижение напряжения;

б) повышение напряжения;

в) отклонение частоты тока;

- г) перекос фаз или дисбаланс фазных напряжений;
- д) провалы напряжений;
- е) наличие гармонических колебаний.

Как известно, АД рассчитан на работу в определенном диапазоне, приближенном к номинальному напряжению. Поэтому при работе с полной нагрузкой повышение напряжения на 10 % существенно увеличивает потери в его сердечнике, что приводит к росту температуры и перегреву АД. Это связано с тем, что нагревание АД обусловлено основными электрическими потерями [4]:

$$P_{1\Delta} = m_1 \cdot I_{1ном}^2 \cdot r_1 \quad \text{или} \quad P_{1\Delta} = m_1 \cdot \left( \frac{P_{ном}}{m_1 \cdot U_{1ном} \eta \cdot \cos \phi_{1ном}} \right)^2 r_1,$$

где  $r_1$  – активное сопротивление обмотки статора.

Повышение температуры окружающей среды усугубляет данную проблему, поэтому введение контроля напряжения сети в устройстве защиты способствовало бы оптимизации защитных характеристик и существенному повышению информативности блока.

Перекос фаз или дисбаланс фазных напряжений является одной из основных причин неисправности АД [5]. К данному режиму можно отнести и режим работы с обрывом одной из фаз. Дисбаланс напряжения в трехфазных АД становится причиной дисбаланса силы тока, что вызывает дополнительные потери, приводящие к росту температуры. В результате сокращается срок службы изоляции статора и АД в целом. Контроль баланса в трехфазной системе усложняется тем, что при работе под нагрузкой трехфазные АД проявляют тенденции к его восстановлению, что маскирует истинные причины аварийного режима.

Провалы напряжений – это кратковременные уменьшения напряжения сети в отличие от длительного его понижения. Они уменьшают момент вращения и дополнительно нагревают обмотку. Кроме того, существенные провалы напряжения влияют на аппаратуру управления, вызывая дребезг контактов, их нагревание, искрение и повреждение. Данная проблема усугубляется, если напряжение в сети уменьшается ниже напряжения удержания аппарата управления во включенном состоянии. В результате происходит отключение в момент действия пусковых токов, что отрицательно сказывается не только на АД, но и на аппаратуре управления.

Гармонические колебания напряжения сети обусловлены наличием дополнительных частот, кратных основной частоте сети. Нагревание, возникающее в результате активных потерь, усиливается из-за дополнительных токов гармонических колебаний. На потери от вихревого тока и гистерезиса существенное влияние оказывает гармонический состав силы тока.

Наличие ее высокочастотных составляющих активизирует процессы нагревания АД.

Гармонические составляющие включают в себя компоненты прямой, обратной и нулевой последовательностей. Компоненты прямой последовательности развивают момент вращения в том же направлении, что и ток основной частоты. Компоненты обратной последовательности развивают момент вращения в противоположную сторону, повышают силу тока АД и создают дополнительное внутреннее его нагревание. Компоненты нулевой последовательности не оказывают влияния на момент вращения. Факторами, влияющими на гармонические составляющие напряжения сети, являются типы присоединенных токоприемников и полное сопротивление системы электроснабжения участка.

На базе анализа факторов, влияющих на работу АД, разработаны дополнительные требования, предъявляемые к устройствам защиты:

- а) защита от аварийных ситуаций;
- б) одновременный контроль силы тока и напряжения;
- в) установка силы рабочего и номинального тока;
- г) защита при тепловой перегрузке;
- д) возможность применения в системах АСУ и диспетчеризации.

Защита от аварийных режимов работы должна контролировать:

- а) обрыв фаз питающей сети;
- б) дисбаланс силы тока и напряжения сети;
- в) провалы напряжения.

Выполнение этих условий должно защитить АД от аварийных ситуаций, связанных с нарушениями в работе сети. В большинстве случаев о несоответствующем состоянии питающей сети судят косвенно по силе тока после включения нагрузки. Одновременный контроль силы тока и напряжения дает возможность анализировать вид аварии и применить соответствующую логику принятия решений, разрешающую или запрещающую повторное включение при данной аварии.

Для правильной работы устройства защиты необходимо как можно точнее задать значение номинальной силы тока АД в качестве основной уставки. От этого зависит эффективность работы защиты и достоверность принятых решений по различным видам изменений силы тока. Точность задания этого параметра предопределяет работу защиты в целом, она необходима для задания критических параметров работы, относительно которых производится отсчет.

Кроме того, необходимо учитывать, что форма кривой силы тока при пуске АД сильно отличается от синусоиды, поэтому необходимо произво-

дить ее гармонический анализ. Учитываться должно только действующее значение силы тока для предотвращения загробления защиты, с одной стороны, или ее ложного срабатывания – с другой.

Для возможности использования АД с максимальной мощностью и обеспечения полноценной тепловой защитой, необходимо проанализировать его перегрузку с учетом предшествующей работы и предварительно накопленного тепла. Это важно при переменной нагрузке на валу, и особенно при периодических перегрузках, т.к. АД может перегреться, находясь в зоне перегрузки кратковременно и периодически возвращаясь в зону номинальной нагрузки, а также при частых пусках.

Применение микропроцессорной техники позволяет применять сложные математические модели для обработки сигнала. При непрерывном измерении действующего значения силы тока, с учетом значений напряжения, частоты тока сети и гармонических составляющих, решается уравнение теплового баланса АД в полном объеме.

Дополнение устройства защиты такими функциями, как возможность хранения и передачи данных о состоянии защищаемого объекта, позволит успешно интегрировать его в системы АСУ ТП предприятий и получать исчерпывающую информацию для оценки возможных отказов и принятия мер по устранению неисправностей.

Для создания алгоритма работы многофункциональной защиты, реализующей указанные выше дополнительные требования, принят перечень параметров аварийных режимов, рассмотренных в данной статье (таблица 1). Указанные в ней параметры должны контролироваться устройством защиты непрерывно.

Таблица 1

Контролируемый параметр	Допустимые границы изменения параметра
$U_{Iном}$	$U_{Imax} > U_{Iном} > U_{Imin}$
$I_U; I_W; I_V$	$I_{Uмод} - I_{Vмод} < \Delta I_{max}$ $I_{Wмод} - I_{Vмод} < \Delta I_{max}$ $I_{Vмод} - I_{Uмод} < \Delta I_{max}$
$t_{вкл.пос.}$	$t_{вкл.пос.} = t_{вкл.пред.} + \int_0^{t_{cp}} U_1 \cdot f_1 \cdot I_{действ} \leq t_{науз.} - t_{доп.}$
$I_{действ}$	$I_{действ} = \sqrt{I_0^2 + \sum_{k=1}^n I_k^2}$

Примечания к таблице 1:

$U_{Iном}$  – номинальное напряжение сети;

$U_{Imax} \dots U_{Imin}$  – допустимый диапазон отклонений напряжения;

$I_U; I_W; I_V$  – сила фазного тока АД;

$I_{Uмод}, I_{Wмод}, I_{Vмод}$  – действующее значение силы фазного тока;

$\Delta I_{max}$  – допустимая несимметрия силы фазного тока;

$t_{вкл.пос.}$  – допустимое время последующего цикла работы АД при данной перегрузке с учетом времени паузы между циклами;

$t_{вкл.пред.}$  – время предыдущего цикла работы АД при данной перегрузке;

$t_{пауз.}$  – пауза между циклами работы АД;

$I_{действ}$  – действующее значение силы тока.

**Вывод.** Выбраны параметры микропроцессорной системы защиты от аварийных режимов работы для шахтных распределительных сетей, внедрение которого позволит оптимизировать работу АД путем его отключения при обнаружении аварийных ситуаций и неблагоприятных условий работы, а также исключить большинство причин, ведущих к возникновению аварийных режимов.

#### Список литературы

1. Савицкий В.Н. Алгоритм работы гибких микропроцессорных защит от аварийных режимов распределительных сетей угольных шахт напряжением до 1200 В /В.Н.Савицкий, А.И.Белошистов, А.В.Савицкий // Взрывозащищенное электрооборудование: сб.науч.тр. УкрНИИВЭ.-Донецк,2007.- С.108-117.
2. [http://iadt.siemens.ua/ru/p\\_s/ia/cd/cc/protection/overload](http://iadt.siemens.ua/ru/p_s/ia/cd/cc/protection/overload) – электронные реле перегрузки фирмы Siemens/
3. [http://azd.ami.ua/azd\\_k.php](http://azd.ami.ua/azd_k.php) – аппарат защиты электродвигателей АЗД-К фирмы АМИ.
4. Кацман М.М. Расчет и конструирование электрических машин / М.М.Кацман.- М.: Энергия, 1984.-360с.
5. Грундулис А.О. Защита электродвигателей в сельском хозяйстве /А.О.Грундулис.- М.:Агропромиздат, 1988.-111с.