УДК 621.316.925

Авторы:
д.т.н. Булычев А.В.,
к.т.н. Козлов В.Н.,
Чернышев И.В.,
ООО «НПП Бреслер»,
Чебоксары, Россия.

D.Sc. Bulychev A.V.,
Ph.D. Kozlov V.N.,
Chernyshev I.V.,
«NPP Bresler» LLC,
Cheboksary, Russia.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ЗА СЧЕТ УПРЕЖДАЮЩЕГО ВЫЯВЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ДЕФЕКТОВ

IMPROVEMENT OF MOTOR PROTECTION DUE TO PROACTIVE DETECTION OF MECHANICAL DEFECTS

Аннотация: перегрузку электродвигателя часто вызывают повреждения в его механической части и в приводимом им механизме (например, разрушение подшипника). Этот процесс может быть выявлен на начальной стадии. Отключение электродвигателя, повреждение в котором неизбежно, но еще не произошло, позволит сохранить высокое качество электрической энергии, избежать внезапных возмущений ЭЭС и не допустить разрушения электродвигателя.

Ключевые слова: электродвигатель, ток статора, упреждающая защита, механические дефекты.

Abstract: overload of the electric motor is often caused by damage in its mechanical part and in the mechanism driven by it (for example, the destruction of the bearing). This process can be identified at an early stage. Disabling motor-damage which is inevitable but hasn't happened yet, will keep high quality of electric energy, to avoid sudden perturbations of the EPS and to prevent the destruction of the motor.

Keywords: electric motor, stator current, proactive protection, mechanical defects.

Актуальность разработки

Электрической энергии в нашей стране сегодня вырабатывается много, более триллиона кВт • час в год. Большая ее часть, примерно, 60% преобразуется в механическую энергию с помощью электродвигателей.

Но, какими бы надежными не были электродвигатели, в них неизбежно возникают повреждения, которые создают возмущения в электрических системах и, следовательно, - риск развития аварийной ситуации. В соответствии с требованиями нормативных документов поврежденные электродвигатели необходимо отключать от исправной части электрической системы с минимально возможной задержкой [1]. Однако, превосходные вычислительные возможности современных устройств релейной защиты (РЗ) позволяют выявлять отдельные виды развивающихся дефектов электродвигателей на ранней стадии развития, и снижать риски развития аварий в электрических системах, связанные с внезапными повреждениями электродвигателей.

Влияние механических дефектов на ток статора

При возникновении механического дефекта в асинхронном электродвигателе (АД) или в его нагрузке, момент сопротивления, воздействующий на вал электродвигателя, периодически изменяется с частотой, пропорциональной частоте вращения вала. Периодическое изменение момента сопротивления вызывает появление в токе статора электродвигателя составляющих с частотой, связанной с частотой вращения вала. Отделение этих составляющих от составляющих тока основной частоты и контроль их уровня позволяют обнаружить дефекты в механической части агрегата «электродвигатель-механизм» [2].

Связь отдельных составляющих тока статора с характером перегрузки при возникновении механических дефектов можно установить, пользуясь общепринятой эквивалентной схемой замещения АД, представленной на рис.1 [3].

Ток фазы статора АД, в соответствии со схемой замещения (параметры которой приведены к обмотке статора), при синусоидальном напряжении питания определяется по формулам (1) и (2) [4]:

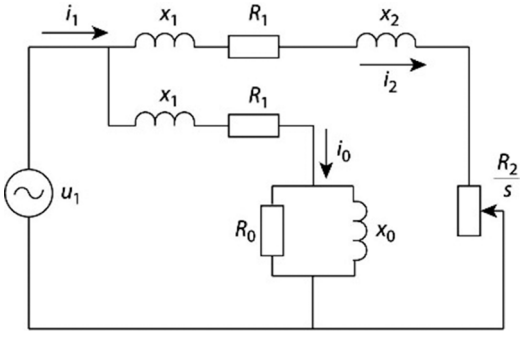

Рис. 1. Эквивалентная схема замещения АД

Булычев Александр Витальевич

Год рождения: 1956.
Окончил в 1980 г. Вологодский политехнический институт по специальности «Электро Снабжение промышленных предприятий, городов и сельского хозяйства», инженер-электрик. В 1984 г. закончил аспирантуру и защитил кандидатскую диссертацию по разработке и исследованию отдельных узлов комплексной (микроэлектронной) системы защиты турбогенераторов. В 1998 г. закончил докторантуру и защитил докторскую диссертацию на тему «Совершенствование защит блоков генератор-трансформатор и электродвигателей». Технический директор ООО «НПП Бреслер», профессор.

Козлов Владимир Николаевич

Год рождения:1952.
Окончил в 1975 г. ЧГУ им. И.Н. Ульянова, кафедра «Электрические аппараты». В 1985 г. защитил кандидатскую диссертацию в Ленинградском политехническом институте на тему «Комплексная защита судовых генераторов». Главный конструктор ООО «НПП Бреслер», доцент.

$$i_1 = i_0 + i_2 = i_0 + \frac{U_{1m} \cdot sin\left(\omega_1 t - \varphi\right)}{\sqrt{\left(x_1 + x_2^{'}\right)^2 + \left(R_1 + \frac{R_2^{'}}{s}\right)^{-1}}}, \quad (1)$$

$$\varphi = arctg\left[\left(x_1 + x_2^{'}\right)\left(R_1 + \frac{R_2^{'}}{s}\right)^{-1}\right], \quad (2)$$

где i_0 и i_2 – ток намагничивания и ток ротора электродвигателя;

U_{1m} – амплитуда напряжения питания;

x_1 и $x_2^{'}$ - индуктивные сопротивления обмоток статора и ротора;

R_1 и $R_2^{'}$ - активные сопротивления обмоток статора и ротора;

s – скольжение;

ω_1 – частота питающего напряжения;

t – время.

Ток статора определяется не только напряжением питания и параметрами электродвигателя, но и скольжением.

Скольжение АД в свою очередь зависит от вращающего момента и, следовательно, от момента сопротивления вращению. Для анализа удобно использовать представление момента сопротивления M_0 суммой статической M_C и периодической синусоидальной составляющих (рис.2):

$$M_C = M_0 + M_A \cdot sin\,\alpha t, \quad (3)$$

где M_A – амплитуда изменения периодической составляющей момента;

α – угловая скорость изменения периодической составляющей момента.

Решение уравнения движения ротора электродвигателя

$$J\frac{d\alpha}{dt} + M_C = M \quad (4)$$

при этих условиях имеет вид:

$$M = M_0 + \frac{M_A}{\sqrt{1+\left(\alpha T_П\right)^2}} \cdot sin\left(\alpha t - \theta\right) + \frac{M_A sin\theta}{\sqrt{1+\left(\alpha T_П\right)^2}} \cdot e^{-\frac{t}{T_П}}, \quad (5)$$

где $T_П = \frac{J\omega_0 s_н}{M_н}; \theta = arctg\,\alpha T_П;$

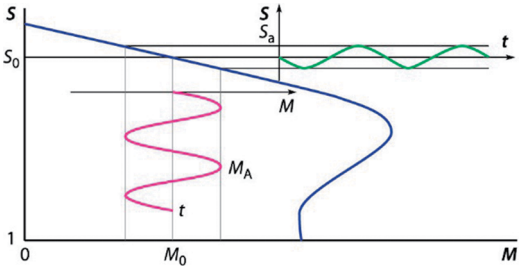

Рис. 2. Механическая характеристика АД

M – вращающий момент электродвигателя;

J – момент инерции агрегата электродвигатель – механизм;

ω_0 – синхронная угловая скорость вращения ротора;

$s_н$ и $M_н$ – номинальное скольжение и вращающий момент электродвигателя.

На линейном участке механической характеристики связь скольжения s и вращающего момента можно выразить формулой:

$$s = M\frac{s_н}{M_н}. \quad (6)$$

Тогда для установившегося режима работы скольжение определяется так:

$$s = s_0 + s_A \cdot sin\,\alpha t, \quad (7)$$

где $s_0 = M_0\frac{s_н}{M_н}$; $s_A = \frac{M_A \cdot s_H}{M_H\sqrt{1+\left(\alpha T_П\right)^2}}$

Периодическое изменение скольжения вызывает периодическое изменение эквивалентного сопротивления АД. Изменение этого сопротивления в свою очередь вызывает изменение тока статора с частотой, равной α. Однако источник питания имеет частоту ω_1, отличную от α и в токе статора появляются составляющие не только с частотой сети, но и с частотами, определяемыми механическими возмущениями.

Новые составляющие в токе статора

Учитывая реальные соотношения параметров АД, когда скольжение не превышает 0,1:

$$x_1 + x_2^{'} \ll \frac{R_2^{'}}{s}; \; R_1 \ll \frac{R_2^{'}}{s} \quad (8)$$

с целью получения наглядных зависимостей можно принять $x_1 + x_2 = R_1 = 0$ и представить ток статора уравнением:

Чернышев Илья Вячеславович

Окончил в 2014 г. магистратуру ЧГУ им. И.Н. Ульянова по специальности «Релейная защита и автоматика электроэнергетических систем». Заведующий сектором защит сетей 6-35 кВ ООО «НПП Бреслер».

$$i_1 = i_0 + \frac{U_{1m} \cdot s_0}{R_2^{'}} \cdot sin\left(\omega_1 t - \varphi\right) + \\ + \frac{U_{1m} \cdot s_A sin\,\alpha t}{R_2^{'}} \cdot sin\left(\omega_1 t - \varphi\right). \quad (9)$$

Подставив в это выражение значение тока намагничивания и разложив произведение синусоидальных функций на две составляющие, получим:

$$i_1 = I_{0m} \cdot sin\left(\omega_1 t - \psi\right) + \\ + \frac{U_{1m} \cdot s_0}{R_2^{'}} \cdot sin\left(\omega_1 t - \varphi\right) + \\ + \frac{U_{1m} \cdot s_A}{2R_2^{'}} \cdot \left[cos\left(\beta t - \varphi\right) - cos\left(\gamma t - \varphi\right)\right], \quad (10)$$

где I_{0m} и ψ – амплитуда и фаза тока намагничивания;

$\beta = \omega_1 - \alpha$;

$\gamma = \omega_1 + \alpha$.

Частоты новых составляющих тока статора

Ток статора при механических повреждениях АД, как видно, содержит составляющие с частотами, равными частоте источника питания, разности частот источника питания и вращения ротора и сумме этих частот. Если машина имеет p пар полюсов, то частоты составляющих соответственно равны:

$$\beta^{'} = \frac{\beta}{2\pi} = \frac{\omega_1}{2\pi}\left(1 + \frac{s-1}{p}\right), \quad 11)$$

$$\gamma^{'} = \frac{\gamma}{2\pi} = \frac{\omega_1}{2\pi}\left(1 + \frac{1-s}{p}\right). \quad (12)$$

Приняв $s = s_0$ и считая частоту питающей сети равной 50 Гц, можно оценить диапазон изменения $\beta^{'}$ и $\gamma^{'}$. Ограничившись режимами работы АД, при которых скольжение s_0 может изменяться от 0,01 до 0,1, будем иметь для двухполюсной машины (синхронная скорость 3000 об/мин) следующие диапазоны возможных изменений частоты: $\beta^{'}$ - от 0,5 до 5 Гц и $\gamma^{'}$ - от 99,5 до 95 Гц.

В таб. 1 показаны возможные диапазоны частот новых составляющих тока статора, возникающих при механических повреждениях, в зависимости от параметров АД.

Таблица 1. Диапазоны возможных изменений частот в зависимости от параметров АД

Параметры АД		Частота $\beta/2\pi$, Гц		Частота $\gamma/2\pi$, Гц	
n, об/мин	$\frac{\omega_1}{2\pi}$, Гц	s = 0,01	s = 0,1	s = 0,01	s = 0,1
3000	50	0,5	5	99,5	95
1500	25	25,25	27,5	74,75	72,5
1000	16,7	33,5	35	66,5	65
750	12,5	37,6	38,75	62,4	61,25
600	10	40,1	41	59,9	59
500	8,3	41,75	42,5	58,85	57,5

Следует отметить, что чем больше полюсов имеет машина, тем меньше изменяются частоты $\beta^{'}$ и $\gamma^{'}$ при изменении скольжения и тем ближе они к частоте источника питания. Для АД с p = 6 (синхронная скорость – 500 об/мин) имеем частоты, соответственно, от 41,75 до 42,5 Гц и от 58,25 до 57,6 Гц.

Амплитуды новых составляющих тока статора

Амплитуды составляющих тока с частотами β и γ зависят не только от напряжения питания и собственных электрических параметров АД, но и от амплитуды переменной составляющей скольжения, которая в свою очередь определяется амплитудой колебаний момента сопротивления вращению вала и инерционностью вращающихся элементов агрегата.

$$\frac{s_A}{s_0} = \frac{M_A}{M_0\sqrt{1 + \left(\alpha T_П\right)^2}}. \quad (13)$$

Из отношения (13) следует, что чем больше величина $\alpha T_П$, тем меньше изменяется скольжение при изменении момента сопротивления и меньше амплитуда анализируемых составляющих тока.

$$\alpha T_П = J\frac{s_H}{P_H}\omega_0^3\left(1 - s_H\right). \quad (14)$$

Рис. 3. Общий вид стенда для испытаний

Приняв во внимание равенство (14) можно отметить, что инерционные свойства проявляются больше у высокоскоростных двигателей, чем у тихоходных. Кроме того, собственный момент инерции двигателя связан с его номинальной мощностью степенной зависимостью с показателем больше 1 [3], поэтому увеличение номинальной мощности АД влечет за собой существенное усиление его инерционности.

В нормальных эксплуатационных режимах момент сопротивления, а, следовательно, и вращающий момент АД с круговой симметрией ротора не зависят от угла поворота вала и не содержат переменной составляющей момента. Это приводит к тому, что скольжение не изменяется периодически и в токе статора отсутствуют составляющие с частотами β и γ, отличными от частоты источника питания.

Установленная связь между механическими возмущающими воздействиями на ротор АД и током статора дает основание полагать, что дефекты в механической части машины могут быть выявлены путем частотной фильтрации отдельных составляющих тока статора и контроля их уровня.

Экспериментальные исследования

Для экспериментальных исследований влияния повреждений в механической части агрегата «электродвигатель-механизм» на ток статора электродвигателя, создан испытательный стенд (рис. 3).

Стенд содержит исследуемый АД типа АДМ112МА6У2 со следующими номинальными параметрами:

$$P_{НОМ} = 3\ кВт;\ I_{НОМ} = 7,6\ А;\ n_{НОМ} = 950\,об/мин;\ \cos\varphi = 0,79,$$

вал которого соединен с валом воздуходувки.

В качестве средства измерения, регистрации и фильтрации тока статора в стенде используется цифровой терминал защиты электродвигателя типа «Бреслер-0107.250» с частотой дискретизации 8 кГц.

Для моделирования повреждений на ребре неподвижного выходного патрубка воздуходувки установлен упругий барьер, выполненный из армированной транспортерной резины. Предусмотрена возможность регулирования высоты этого барьера. На наружном ободе ротора воздуходувки установлен жесткий груз.

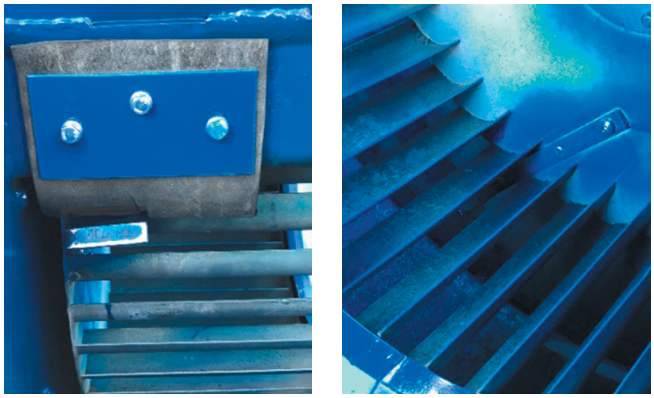

Рис.4. Ротор воздуходувки с грузом и упругий барьер на статоре

При наличии зазора между неподвижным барьером и вращающимся грузом нарушается только осевая балансировка агрегата. Степень нарушения балансировки регулируется путем изменения массы жесткого груза.

Высоту неподвижного барьера можно регулировать. Если барьер установлен так, что при провороте ротора воздуходувки жесткий груз касается упругого барьера, то на каждом провороте ротора создается ударный (толчком) тормозной момент (рис. 4).

В процессе исследований имитировались различные механические повреждения элетродвигателя: нарушение осевой балансировки, разрушение подшипника вала, деформация и разрушение вращающихся элементов механизма (табл. 2).

При каждом опыте фазные токи и напряжения фиксировались терминалом типа «Бреслер-0107.250» в виде файлов осциллограмм. Для анализа осциллограмм использовался программный комплекс WinBres компании ООО «НПП Бреслер».

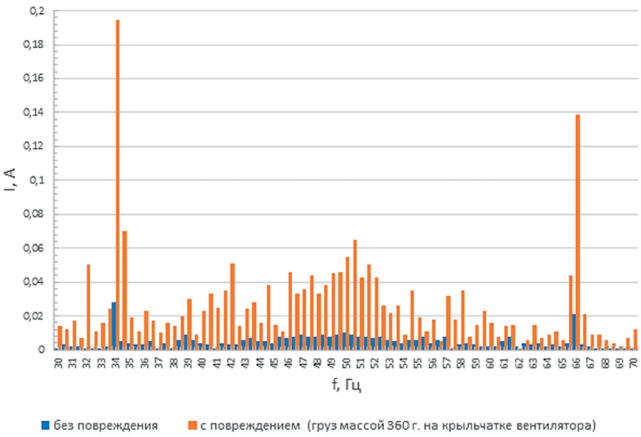

Рис.5. Спектрограмма тока статора электродвигателя при нарушении балансировки и переменном тормозном моменте с частотой вращения вала

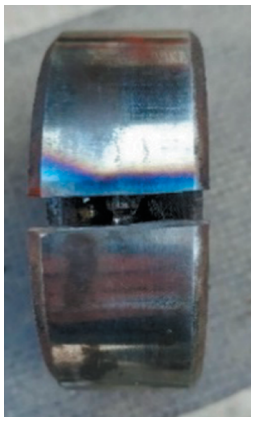

Рис.6. Подшипник с разрезанной обоймой

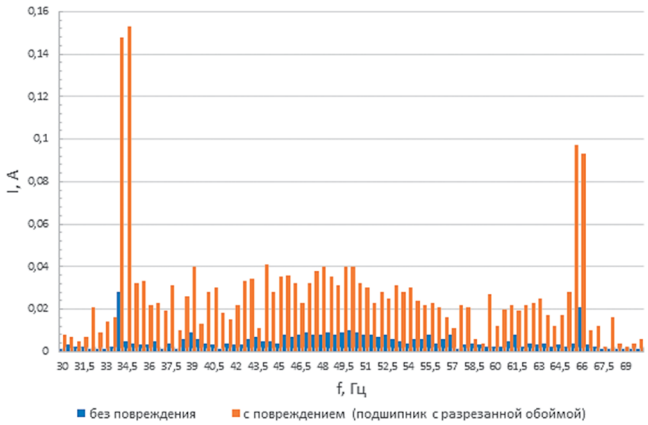

Рис.7. Спектрограмма тока статора с поврежденным подшипником (с прорезью в обойме)

На основе анализа полученных осциллограмм, а именно, частотном спектральном анализе тока статора электродвигателя, построены спектрограммы тока статора в диапазоне от 30 Гц до 70 Гц с шагом 0,5 Гц.

Таблица 2. Описание режимов работы двигателя при испытаниях

Тип нагрузки	Вид повреждения	Способ имитации повреждения	Спектрограмма тока статора
Номинальная	Нарушение балансировки	На обод ротора закреплен груз, массой 100 г., который соприкасается с барьером при каждом провороте вала	Рис. 5
Номинальная	Повреждение подшипника вала	Разрезана обойма пошпиника вала	Рис. 6

Для моделирования повреждения подшипника ротора электродвигателя была разрезана наружная обойма подшипника. Ширина прорези – 2,5 мм. На рис.6 показан данный подшипник, который устанавался на вал при экспериментах.

Проведен частотный анализ полученных при экспериментах осциллограмм тока статора (рис. 6, рис. 7). Как видно из спектрограмм амплитуды составляющих тока статора на частотах, указанных в табл. 1, при повреждениях превышают амплитуды соответствующих составляющих на этих частотах без повреждений в 3-5 раз. Это подтверждает возможность выявления рассматриваемых дефектов по току статора путем спектрального анализа тока статора, выделения составляющих этого тока с определенными частотами и сравнения этих составляющих с пороговыми значениями по определенным параметрам.

Сравнительный анализ математических выражений (полученных аналитическим путем) и спектрограмм тока статора, полученных при физическом моделировании, позволяет сделать вывод о том, что при повреждениях появляются существенные по амплитуде составляющие на частотах, полученных аналитическим путем. Это подтверждает правомерность принятых при исследованиях ограничений и допущений, и дает основание сделать вывод о возможности реализации этого метода в РЗ электродвигателя.

Выводы:

1. Разработан и обоснован метод выявления дефектов в механической части агрегата «электродвигатель - механизм» по току статора АД. Реализация разработанного метода в РЗ позволяет выявлять и отключать (без применения экстренного отключения) электродвигатель, повреждение в котором неизбежно, но еще не произошло, тем самым сохранить высокое качество электрической энергии, избежать внезапных возмущений в электрической сети и не допустить разрушения электродвигателя.

2. Определены частотные диапазоны составляющих тока статора АД, появление которых связано с возникновением дефектов в механической части агрегата «электродвигатель-механизм». Показана возможность выделения этих составляющих тока статора в реальных условиях эксплуатации электродвигателей.

3. Подтверждена правомерность принятых при исследованиях ограничений и допущений путем сопоставления результатов математического и физического моделирования.

Литература:

1. Правила устройства электроустановок. – 7-е издание, переработанное и дополненное. – 2002.
2. Булычев А.В., Кулаков Е.В., Третьяков В.Л. Способ защиты асинхронного электродвигателя от перегрузки / А.с. СССР № 1642548.
3. Гейлер Л.Б. Основы электропривода / Минск: Вышейшая школа, 1972. – 608 с.
4. Булычев А.В., Ванин В.К. Контроль состояния механической части асинхронного электродвигателя // Электричество. – №8. – 1997. – С. 45-47.