

Каждое внезапное возмущение, обусловленное повреждением, повышает риск возникновения аварийной ситуации в электроэнергетической системе (ЭЭС). В идеале, желательно, чтобы система релейной защиты обеспечивала мгновенное отделение поврежденного элемента от исправной части ЭЭС. Но для выявления повреждения и осуществления коммутации необходим определенный интервал времени.

Быстродействие алгоритмов многих защит достигло методически возможного предела, обусловленного частотой источников питания в ЭЭС. Приблизить свойства релейной защиты к идеальным в сложившихся условиях можно путем реализации упреждающих действий за счет выявления потенциальных повреждений на ранней стадии развития, о чем Александр Витальевич Бульчев уже писал в нашем журнале («Новости Электротехники», № 4(58) 2009). Сегодня он рассматривает защиту упреждающего действия, устанавливаемую на электродвигатели.

## ЗАЩИТА УПРЕЖДАЮЩЕГО ДЕЙСТВИЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Вполне реальным последствием перегрузки электродвигателя может являться перегрев изоляции обмоток, последующий ее пробой и короткое замыкание. При этом КЗ можно предотвратить за счет упреждающих действий релейной защиты, что подтверждается многолетним опытом использования защит от перегрузки, устанавливаемых на электродвигателях и других объектах.

Перегрузку часто вызывают повреждения в механической части электродвигателя и в приводимом им механизме (например, разрушение подшипника). Этот (или подобный ему) процесс может быть выявлен на начальной стадии, в предаварийном состоянии контролируемого защитой объекта. Отключение электродвигателя, повреждение в котором неизбежно, но еще не произошло, позволит сохранить высокое качество электрической энергии в ЭЭС, избежать внезапных возмущений ЭЭС и не допустить разрушения электродвигателя. Это особенно важно, если машины работают в условиях, где затруднен или ограничен доступ для выполнения технического обслуживания и ремонта. В итоге это позволит существенно снизить материальный ущерб, вызванный аварийной ситуацией, как для владельца электродвигателя, так и для ЭЭС.

### 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, пропорциональной частоте вращения вала. Отделение этих составляющих от составляющих тока основной частоты и контроль их уровня позволяют обнаружить дефекты в механической части привода [1].

Связь отдельных составляющих тока статора с характером перегрузки при возникновении механических дефектов можно установить, пользуясь общепринятой эквивалентной схемой замещения АД [2] (рис. 1).

Ток фазы статора АД, в соответствии со схемой замещения, при синусоидальном напряжении питания определяется следующим образом [3]:

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

$$\varphi = \arctg[(x_1 + x_2')(R_1 + R_2' / s)^{-1}],$$

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;  $\omega_1$  – частота питающего напряжения.

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



**Александр Бульчев,**  
д.т.н., профессор, заместитель  
генерального директора  
ОАО «ВНИИР» по науке,  
г. Чебоксары

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

$$M_C = M_0 + M_A \sin \alpha t,$$

где  $M_A$  и  $\alpha$  – амплитуда и угловая скорость изменения периодической составляющей момента сопротивления соответственно.

Решение уравнения движения ротора электродвигателя:

$$J \frac{d\alpha}{dt} + M_C = M,$$

в этих условиях имеет следующий вид:

$$M = M_0 + \frac{M_A}{\sqrt{1 + (\alpha T_{II})^2}} \sin(\alpha t - \theta) + \frac{M_A \sin \theta}{\sqrt{1 + (\alpha T_{II})^2}} e^{-\alpha T_{II}},$$

где  $T_{II} = J \omega_0 s_H / M_H$ ;

$\theta = \arctg \alpha T_{II}$ ;

$M$  – вращающий момент электродвигателя;

$J$  – момент инерции агрегата двигатель-механизм;

$\omega_0$  – синхронная угловая скорость вращения ротора;

$s_H$  и  $M_H$  – номинальные скольжение и вращающий момент электродвигателя.

На линейном участке механической характеристики связь скольжения  $s$  и вращающего момента можно выразить следующим образом:

$$s = M s_H / M_H.$$

Тогда, для установившегося режима работы:

$$s = s_0 + s_A \sin \alpha t,$$

$$\text{где } s_0 = M_0 \frac{s_H}{M_H}; s_A = \frac{M_A s_H}{M_H \sqrt{1 + (\alpha T_{II})^2}}.$$

Периодическое изменение скольжения вызывает периодическое изменение эквивалентного сопротивления АД. Изменение этого сопротивления, в свою очередь, вызывает изменение тока статора с частотой, равной  $\alpha$ . Однако источник питания имеет частоту  $\omega_1$ , отличную от  $\alpha$ , 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:

$$x_1 + x_2' \ll R_2' / s; R_1 \ll R_2' / s,$$

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

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

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

$$i_1 = i_{0m} \sin(\omega_1 t - \Psi) + \frac{U_{1m} s_0}{R_2'} \sin(\omega_1 t - \varphi) + \frac{U_{1m} s_A}{2R_2'} \times [\cos(\beta t - \varphi) - \cos(\gamma t - \varphi)]$$

где  $I_{0m}$  и  $\Psi$  – 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:

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

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

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 (табл. 1).

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  $\beta$  и  $\gamma$  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.

Из отношения

$$\frac{S_A}{S_0} = \frac{M_A}{M_0 \sqrt{1 + (\alpha T_{II})^2}}$$

следует, что чем больше величина  $\alpha T_{II}$ , тем меньше изменяется скольжение при изменении момента сопротивления и меньше амплитуда анализируемых составляющих тока.

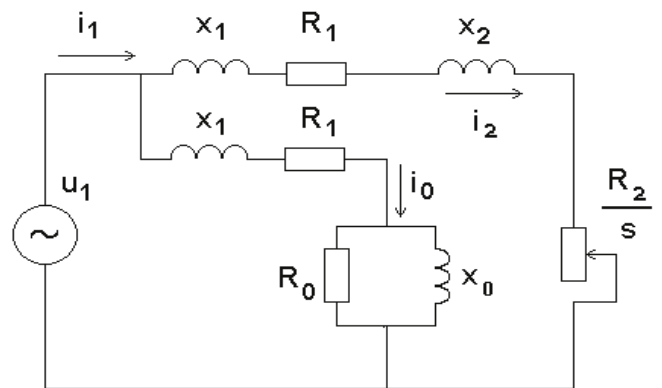
Приняв во внимание равенство:

$$\alpha T_{II} = J \frac{S_H}{P_H} \omega_0^3 (1 - s_H)^2 ,$$

где  $P_H$  – номинальная мощность АД, можно отметить, что инерционные свойства проявляются больше у высокоскоростных

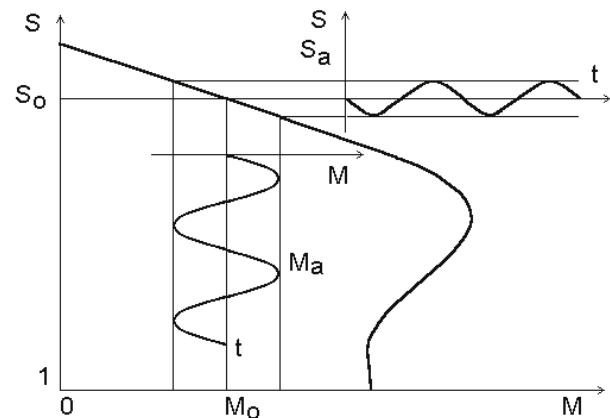
Эквивалентная схема замещения асинхронного электродвигателя

Рис. 1 •



Механическая характеристика асинхронного двигателя

Рис. 2 •



Диапазоны возможных изменений частот в зависимости от параметров асинхронного двигателя

Таблица 1 •

Параметры АД		Частота составляющей $\beta / 2\pi$ , Гц		Частота составляющей $\gamma / 2\pi$ , Гц	
$n$ , об/мин	$\omega_0 / 2\pi$ , Гц	При $s = 0,01$	При $s = 0,1$	При $s = 0,01$	При $s = 0,1$
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	58,25	57,5

• **Рис. 3.** Осциллограмма тока статора при моделировании повреждений в механической части электродвигателя



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 усиление его инерционности.

Для АД общего применения с номинальными мощностями от 2,2 кВт до 22 кВт, работающих в режиме близком к номинальному, отношение  $s_A/s_0$  может составлять от 0,98  $M_A/M_0$  до 0,3  $M_A/M_0$ . Большее значение соответствует тихоходному (синхронная скорость 500 об/мин) двигателю с меньшей номинальной мощностью, а меньшее значение – быстроходному (синхронная скорость 3000 об/мин) двигателю с большей номинальной мощностью.

При полигармоническом изменении возмущающего момента, что чаще всего и происходит в реальных условиях, в токе содержатся кроме основной частоты еще и боковые разностные частоты от гармоник основной частоты. Спектральный состав тока статора при этом очень разнообразен, что подтверждают и осциллограммы, полученные в лабораторных условиях при моделировании повреждений в механической части АД (рис. 3).

В нормальных эксплуатационных режимах момент сопротивления, а следовательно, и вращающий момент АД с кру-

говой симметрией ротора не зависит от угла поворота вала и не содержит переменной составляющей момента. Это приводит к тому, что скольжение не изменяется периодически, и в токе статора отсутствуют составляющие с частотами  $\beta$  и  $\gamma$ , отличными от частоты источника питания.

Установленная связь между механическими возмущающими воздействиями на ротор АД и током статора дают основание полагать, что дефекты в механической части машины могут быть выявлены путем частотной фильтрации отдельных составляющих тока статора и контроля их уровня. Современные средства обработки сигналов открывают широчайшие возможности для реализации защиты.

### ВОЗМОЖНЫЙ АЛГОРИТМ ДЕЙСТВИЯ ЗАЩИТЫ

Реализация рассмотренного метода контроля механических характеристик АД в защите связана с определенными особенностями, обусловленными высокими требованиями к качеству фильтрации информативных составляющих тока статора. Важнейшая особенность состоит в том, что частотно-избирательный фильтр должен иметь очень узкую полосу заграждения и амплитудно-частотную характеристику высокой степени прямоугольности (см. табл. 1).

Использование аналогового активного фильтра высокого порядка здесь невозможно из-за колебаний частоты в питающей сети. Необходим режекторный фильтр, частота максимального ослабления которого равна частоте в питающей сети. Этими свойствами обладают дискретные SC-фильтры (switched capacitor filters) с переключаемыми конденсаторами [4].

На рис. 4а в качестве примера показана структурная схема устройства для контроля механических характеристик, построенного на основе SC-режекторного фильтра, в состав которого входят: ключ; формирователь импульсов управления; запоминающий элемент; фильтр верхних частот. Устройство содержит также преобразователь ток–напряжение; формирователь модуля; сглаживающий фильтр нижних частот; пороговый элемент (компаратор).

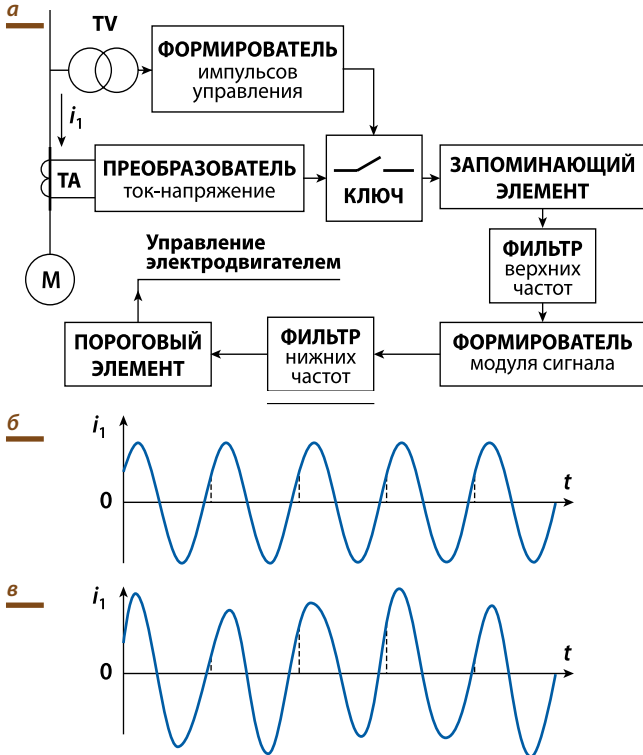
Входным сигналом для этого канала служит ток одной фазы статора. С помощью трансформатора тока и входного преобразователя ток–напряжение он преобразуется в напряжение, удобное для обработки микроэлектронными элементами.

С помощью режекторного фильтра подавляются составляющие сигнала с частотой, равной частоте источника питания. Таким образом, через фильтр проходят только те составляющие сигнала, частота которых отличается от частоты источника питания.

Выходной сигнал фильтра выпрямляется формирователем модуля, сглаживается и подается на вход порогового элемента, который сравнивает выходной сигнал фильтра с предельно допустимым значением (уставкой). При превышении входным сигналом допустимого уровня пороговый элемент формирует сигнал, информирующий о возникновении механического дефекта в защищаемом объекте.

В нормальных условиях ток статора АД имеет синусоидальную (или близкую к ней) форму. Поэтому выборки значений тока, соответствующие определенной фазе сигнала, в установившемся режиме (когда амплитуда тока не изменяется)

- **Рис. 4.** **а** Структурная схема устройства для контроля механических характеристик асинхронного двигателя (АД) на основе SC-режекторного фильтра
- б** Выборки значений тока статора в нормальном режиме работы АД
- в** Выборки значений тока статора при повреждении АД



имеют одинаковые значения (рис. 4б). В результате, на выходе запоминающего элемента устанавливается сигнал постоянного уровня. Поскольку входной сигнал фильтра имеет постоянное значение, то сигнал на выходе фильтра верхних частот равен нулю. Следовательно, он не вызывает срабатывания исполнительного элемента защиты.

При возникновении механического дефекта выборки тока статора, подаваемого на вход запоминающего элемента, отличаются одна от другой, и уровень сигнала на выходе запоминающего элемента изменяется (рис. 4в).

Этот переменный сигнал проходит через фильтр верхних частот, выпрямляется формирователем модуля, усредняется фильтром нижних частот и поступает на вход порогового элемента. Если уровень сигнала выше порога срабатывания, то пороговый элемент воздействует на исполнительный элемент защиты, который формирует сигнал, информирующий о появлении дефекта или отключающий защищаемый электродвигатель.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Резюмируя, можно отметить, что данный способ дает возможность выявления дефектов в подшипниковых узлах асинхронных электродвигателей и их нагрузок по току статора электродвигателя. В основу алгоритма действия устройства положен специальный метод фильтрации составляющих тока с частотами, отличными от частоты источника питания.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Булычев А.В., Кулаков Е.В., Третьяков В.Л. Способ защиты асинхронного электродвигателя от перегрузки. А. с. СССР № 1642548.
- 2 Гейлер Л.Б. Основы электропривода. Минск: Высшая школа, 1972. 608 с.
- 3 Булычев А.В., Ванин В.К. Контроль состояния механической части асинхронного электродвигателя // Электричество. 1997. № 8. С.45-47.
- 4 Гауси М., Лакер К. Активные фильтры с переключаемыми конденсаторами. М.: Радио и связь, 1986. 168 с.