

## РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА ЗАЩИТЫ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ФАКТОРОВ ПУСКОВЫХ И ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМОВ (Часть 1)

### Введение

Практика эксплуатации асинхронных двигателей (АД) свидетельствует о том, что 80% их аварий происходит из-за отсутствия или неисправности аппаратов защиты, несоответствия характеристик двигателя и средств его защиты.

При этом важно оперативно обнаружить нарушения в работе двигателя для своевременного его отключения. Особенно актуальна задача обнаружения неисправностей, возникших в отключенном состоянии, до пуска двигателя. Тогда уже при его пуске можно упредить возможную аварийную ситуацию и предотвратить выход из строя АД до достижения им установившегося рабочего режима. Также дополнительным фактором, повышающим риск отказа, являются различные переходные режимы, которые актуальны для привода, работающего в реальных производственных условиях.

Внутренние повреждения, которые возникают в электродвигателе, приводят к изменению его параметров и, следовательно, вызывают изменение режима. Переход электродвигателя в новый режим неминуемо сопровождается переходным процессом, характер которого определяется его активными и реактивными параметрами и временем изменения режима.

### Цель работы

В настоящей работе дана оценка возможности создания защиты АД при технологических перегрузках, аварийных режимах на стадии его пуска, рабочей скорости и описано устройство практической реализации универсальной защиты, включая принципиальную схему.

### Физическое обоснование метода

Основные причины отказов и идентификационные параметры АД приведены в табл. 1. Связь контролируемых идентификационных параметров с основными причинами отказов [1] оценена следующим образом. Для параметра, критичного к причине отказа, принято обозначение – 1, параметр, не связанный с причиной отказа, обозначен через 0. Оценка 0-1 показывает, что только при определенных условиях можно выявить причину отказа. Идентификационные параметры обозначены: I – ток двигателя;  $\theta$  – температура обмоток;  $\varphi$  – угол сдвига между током и напряжением; M – момент на валу; I<sub>y</sub> – ток утечки; U – питающее напряжение.

Таблица 1

Причина отказов АД	Количество отказов %	Идентификационные параметры					
		I	$\theta$	$\varphi$	M	I <sub>y</sub>	U
Неполнофазный режим	20	0-1	0-1	1	0	0	1
Увлажнение	20	0	0	0	0	1	0
Перегрузка	20	1	1	1	1	0	0-1
Заклинивание	10	1	1	1	1	0	0-1
Старение	5	0	0-1	0	0	0-1	0
Износ	7	0	0-1	0	0	0	0
Прочее	8	—	—	—	—	—	—

Анализируя данные табл. 1, приходим к выводу, что ни один из рассмотренных идентификационных параметров не является универсальным. Так, считающиеся универсальными идентификационные параметры температура  $\theta$  обмотки статора и ток I двигателя имеют устойчивую связь только с 30 % причин отказов. Для срабатывания защиты в любых аварийных режимах необходимо контролировать несколько параметров (для учета не менее 85% причин их должно быть

больше трех). Сравнение оценок позволяет разделить причины на категории по доступности. Их можно обнаружить по току, температуре и моменту. Наименее доступными для контроля причинами являются временные перенапряжения, износ и старение изоляции и узлов АД.

Исследования электродвигателей на нагрев в различных режимах показывают отличие постоянной времени  $T_{\text{н}}$  при номинальной нагрузке от постоянной времени  $T_{\text{у}}$  в других режимах. С увеличением нагрузки уменьшается  $T_{\text{у}}$  – постоянная времени нагрева электродвигателя. Наибольшее снижение  $T_{\text{у}}$  происходит в диапазоне нагрузок от  $I_{\text{н}}$  до  $2,5I_{\text{н}}$  и при дальнейшей перегрузке почти не изменяется, и при  $5I_{\text{н}}$  практически становится равной постоянной времени  $t_0$  обмотки статора, т.е.  $T_{\text{у}} = T_0$ . Если охлаждение происходит при неподвижном роторе, то постоянная времени охлаждения равна постоянной времени нагрева при работающем двигателе. Различие условий охлаждения обмотки статора характеризуется коэффициентом  $\beta$ :

$$\beta = A_{\text{охл}}/A,$$

где  $A_{\text{охл}}$  – теплоотдача обмотки при охлаждении с неподвижным ротором;

$A$  – теплоотдача при  $\omega \neq 0$ .

Если охлаждение происходит при снижении скорости двигателя, близкой к номинальной, то условия теплообмена не отличаются от условий нагрева при той же нагрузке, поэтому  $T_{\text{у охл}}$  та же, что и для нагрева.

Чрезмерная перегрузка часто является следствием неполадок в приводной машине, ошибочных действий эксплуатационного персонала или неисправностей в системе автоматического управления АД.

Оценка значений параметров асинхронных машин в режимах нормального пуска, холостого хода, номинальной нагрузки и сравнения их с режимами при витковых и межфазных замыканиях в обмотках статора позволяет выявить внутренние замыкания в обмотках асинхронных двигателей по факту выхода значений R-L параметров за пределы установленных значений.

Общая эквивалентная входная индуктивность контролируемого электродвигателя относительно его зажимов, измерения которой доступны непрямыми методами, и содержит информацию о его состоянии.

Главная индуктивность фазы статора  $L_A$  и ротора  $L_r$  определяется геометрическими размерами зазора, магнитными свойствами среды зазора ( $\mu_0$ ) и обмоточными данными обмотки статора и ротора. При возникновении витковых замыканий, которые сопровождаются уменьшением числа витков, главная фазная индуктивность поврежденной обмотки уменьшается [2].

Межфазные и однофазные короткие замыкания на выводах обмоток статора приводят к практически полному ее шунтированию. При этом активное сопротивление и главная индуктивность поврежденных фаз электродвигателя намного меньше соответствующих параметров в нормальных режимах.

Взаимная индуктивность, например, между фазами А и В статора –

$$L_{AB} = \frac{\Psi_{AB}}{i_A} = \frac{\Psi_{AAm}}{i_A} \cos \alpha_{AB} = L_A \cos \alpha_{AB},$$

где  $\alpha_{AB}$  – электрический угол между осями фаз статора;

$\Psi_{AB}$  и  $\Psi_{AAm}$  – значение потокосцеплений между фазами А и В обмотки статора и обмотками фазы А.

Для симметричной трехфазной обмотки углы  $\alpha_{\text{вн}} = \frac{2\pi}{3}$ ,  $\alpha_{\text{сн}} = \frac{4\pi}{3}$ .

При таких углах  $\cos \alpha_{\text{вн}} = \cos \alpha_{\text{сн}} = -\frac{1}{2}$ .

Исходя из этого:  $L_{AB} = L_{BC} = L_{CA} = -\frac{L_A}{2}$ .

Взаимная индуктивность [3] между разными фазами обмотки статора или между разными фазами обмотки ротора не превосходит по значению собственную индуктивность и имеет отрицательный знак. Потому в любом режиме учет взаимной индуктивности приводит к снижению общей индуктивности.

Взаимная индуктивность между фазами статора и ротора определяется так:

$$L_{Aa} = L_{Bb} = L_{Cc} = L_m \cos \alpha_{Aa},$$

$$L_{Ab} = L_{Bc} = L_{Ca} = L_m \cos \alpha_{Ab},$$

$$L_{Ac} = L_{Ba} = L_{Cb} = L_m \cos \alpha_{Ac},$$

где  $L_m = \frac{4\mu}{p \cdot \pi^2} (w_1 k_{01} w_2 k_{02}) \frac{\tau l_{\sigma}}{\sigma k_{\sigma}}$  - максимальная взаимная индуктивность между фазой обмотки

статора и фазой обмотки ротора;

$\alpha$  - электрический угол между осями фаз статора и ротора;

$w_1$  - количество витков фазы статора;

$w_2$  - количество витков фазы ротора;

$\tau, l_{\sigma}, k_{\sigma}, \sigma$  - конструктивные параметры электродвигателя.

Трехфазный асинхронный электродвигатель для целей выявления внутренних коротких замыканий можно представить тремя R-L двухполосниками без взаимных индуктивностей (рис.1).

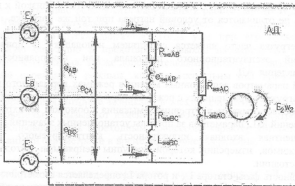


Рис.1. Схема замещения трехфазного АД

Межфазные мгновенные значения напряжения можно выразить через межфазные токи для контролируемого защитой электродвигателя:

$$u_{AB} = R_{эквAB} i_{AB} + L_{эквAB} \frac{di_{AB}}{dt},$$

$$u_{BC} = R_{эквBC} i_{BC} + L_{эквBC} \frac{di_{BC}}{dt},$$

$$u_{CA} = R_{эквCA} i_{CA} + L_{эквCA} \frac{di_{CA}}{dt}.$$

На схеме и в уравнениях приняты обозначения:

$R_{эквAB}, R_{эквBC}, R_{эквCA}$  и  $L_{эквAB}, L_{эквBC}, L_{эквCA}$  - значения эквивалентных активных сопротивлений и индуктивностей статора, соответственно;

$u_{AB}, u_{BC}, u_{CA}$  и  $e_{AB}, e_{BC}, e_{CA}$  - мгновенные значения межфазного напряжения и эдс, соответственно;

$i_{AB}, i_{BC}, i_{CA}$  - мгновенные значения межфазных токов в обмотке статора.

Значения R-L параметров, которые входят в эти уравнения как постоянные величины, позволяют судить о состоянии контролируемого электродвигателя.

Поскольку любое внутреннее короткое замыкание в обмотке статора вызывает уменьшение общей входной эквивалентной индуктивности, то защита может быть реализована на пороговом принципе.

Условия срабатывания защиты:

$$L_{экв} < L_{доп},$$

$$R_{экв} < R_{доп},$$

или

$$L_{\text{экв}} < K_3 L_{\text{доп}},$$

$$R_{\text{экв}} < K_3 R_{\text{доп}}.$$

Здесь  $L_{\text{доп}}$  и  $R_{\text{доп}}$  - допустимые значения общих эквивалентных входных индуктивностей и активного сопротивления контролируемого электродвигателя;  $K_3$  - коэффициент запаса ( $K_3 < 1$ ).

Определение эквивалентных параметров при нормальных режимах работы с целью выбора уставок в реальном устройстве может проводиться опытным путем на исправном электродвигателе при пробном пуске.

Наибольший рабочий ток возникает в обмотке статора при пуске электродвигателя, когда ротор неподвижен и скольжение равняется единице. По мере разгона электродвигателя уменьшается скольжение и увеличивается активная составляющая сопротивления ротора. В результате этого уменьшается фазовый угол и снижается ток ротора и статора [3,6]. На рис. 2 показано изменение тока статора во время пуска асинхронного электродвигателя под нагрузкой.

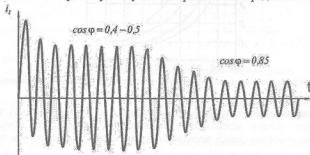


Рис. 2. График изменения тока статора во время пуска АД

Время разгона электродвигателя зависит как от собственных параметров, так и от характеристик приводного механизма.

В начале процесса разгона коэффициент мощности составляет 0,4...0,5 (фазовый угол  $70^\circ \dots 60^\circ$ ). В завершающей стадии при пуске с нагрузкой он приближается к номинальному значению 0,8...0,85 (фазовый угол  $36^\circ \dots 30^\circ$ ). Если же электродвигатель запускается без нагрузки, то после некоторого повышения в завершающей стадии пуска коэффициент мощности снижается к уровню, определяемому режимом холостого хода [4].

Пусковой ток, в основном, определяется параметрами обмотки ротора и может превышать номинальный в 3...7 раз. При этом ток намагничивания составляет незначительную часть тока статора и его можно не учитывать. Это позволяет упростить схему замещения и перейти к последовательной R-L - цепи, которая содержит параметры обмотки статора ( $R_1$  и  $L_1$ ) и ротора ( $R_2$  и  $L_2$ ), как показано на рис. 3.

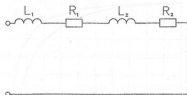


Рис. 3. Упрощенная схема замещения АД

Эквивалентная индуктивность в начальной стадии пуска составляет (20...40)% эквивалентной индуктивности в номинальном режиме. Эквивалентное активное сопротивление при пуске в 4...8 раз меньше, чем в номинальном режиме.

Изменение активного сопротивления ротора в процессе пуска происходит не только из-за изменения скольжения, но и в связи с проявлением эффекта вытеснения тока в стержнях обмотки ротора при изменении частоты тока ротора [3].

Рассмотрим влияние кратности максимального момента на время разгона для двигателя нормального типа с критическим скольжением  $S_{\text{кр}}=0,15$ , приводящего в движение механизм с относительным моментом сопротивления вентиляторного типа:

$$M_c = 0,15 + 0,85(1-s)^2.$$

Из рассмотрения построенных для данного случая кривых на рис. 4 следует, что время разгона весьма сильно зависит от кратности максимального момента: например, при увеличении кратности максимального момента с 1,6 до 2,5 время пуска уменьшается при номинальном напряжении в 2 раза, а при напряжении 0,7 номинального — в 2,4 раза.

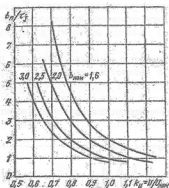


Рис.4. Кривые времени разгона в долях времени ускорения в функции напряжения при различных кратностях  $M_{кр}$

В процессе пуска двигатель потребляет повышенный ток. Зная зависимость тока от времени, нетрудно определить потери мощности и превышение температуры обмоток двигателя. Ориентировочно для основных типов асинхронных двигателей эквивалентное значение тока за время пуска  $t_n$

$$I_{эк} = \sqrt{\frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} I^2 dt}$$

и кратность тока

$$k_{эк} = \frac{I_{эк}}{I_{НОМ}}$$

Значение  $I_{эк}$  можно определить графо-аналитически по кривой зависимости пускового тока  $I$  от времени  $t$ , построенной на основании кривой пускового тока  $I=f(s)$  и кривой разгона  $s=f(t)$ . В качестве примеров на рис. 5, 6 даны кривые пускового тока при номинальном напряжении и кривые разгона при пуске асинхронных двигателей с простой беличьей клеткой, имеющих кратность номинального момента  $b_{ном}=2$ ,  $s_{кр}=0,1$  и  $0,15$ , приводящих во вращение механизм с вентиляторным моментом сопротивления.

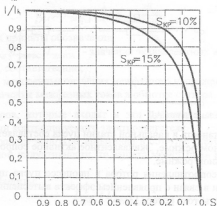


Рис. 5. Кривые пускового тока в зависимости от скольжения для АД

Для рассмотренных выше случаев можно принять при ориентировочных подсчетах  $I_{эк}=0,93I_k$  причем  $I_k$  — действующее значение периодической составляющей начального пускового тока при неподвижном роторе.

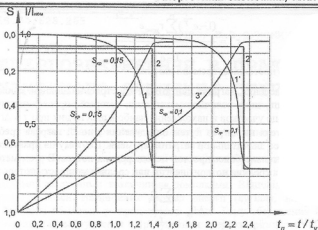


Рис. 6. Кривые разгона и пускового тока АД в функции времени:

1 и 1' – пусковые токи, 2 и 2' – эквивалентные значения пусковых токов,  
3 и 3' – кривые разгона АД

Простым увеличением мощности не всегда можно добиться требуемого увеличения начального момента при пуске, вследствие потери напряжения в сопротивлении, включенном между источником питания и двигателем.

При длительной переменной нагрузке (рис. 7) и изменении тока  $I$  необходима проверка правильности выбора мощности двигателя на нагрев [5] путем определения наибольшей температуры  $\tau_{\max}$  и сравнения ее с допустимой  $\tau_{\text{доп}}$ :

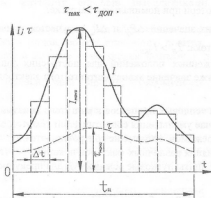


Рис. 7. Графики изменения нагрузки и кривой температуры нагрева АД

Проверка на нагрев требует определения максимальной температуры двигателя и может осуществляться заменой кривой нагрузки с током  $I$  ступенчатой ломаной линией с постоянной нагрузкой на отдельных ступенях. При этом уравнение кривой нагрева на любой  $q$ -й ступени определяется из равенства:

$$\tau = \tau_{\text{уст}q} + (\tau_{\text{н}q} - \tau_{\text{уст}q}) e^{-\frac{t}{T}},$$

где  $\tau_{\text{уст}q}$  — установившаяся температура, соответствующая потерям  $\Delta P_q$  на  $q$ -й ступени;

$\tau_q$  — начальная температура на  $q$ -й ступени.

В предположении одинаковости температуры перегрева в начале и конце цикла, а также при условии одинаковой ширины участков, т.е. при  $\Delta t = \text{const}$ , для начальной температуры на первом участке можно использовать выражение

$$\tau_{\text{н1}} = \frac{(1 - e^{-\frac{t}{T}}) \sum_{i=1}^n \tau_{\text{усм}i} e^{-\frac{t_i - \Delta t_i}{T}}}{1 - e^{-\frac{t}{T}}},$$

где  $m$  - число участков,  $T$  - постоянная времени нагрева.

В сущности, для определения нагрева двигателя построения полной кривой нагрева не требуется, а необходимо лишь знать величину максимума, который определяется путем подсчета значений температуры в конце участков и нахождения наибольшей из них при  $t = \Delta t$ .

Метод проверки двигателя на нагрев путем определения кривой нагрева требует большого числа вычислений и связан со значительной затратой времени. Поэтому на практике применяется менее точный, но зато значительно более простой метод средних потерь. В этом методе в качестве мерила нагрева принимаются средние потери энергии или средняя мощность потерь за цикл:

$$\Delta P_{\text{ср}} = \frac{\sum Q_q}{t_q},$$

где  $Q_q$  - потери на  $q$ -м участке графика нагрузки,  $m$  - число участков графика нагрузки.

При этом для проверки используется условие:  $\Delta P_{\text{ср}} < \Delta P_{\text{н}}$ .

Нагрев считается допустимым, если средние цикловые потери не превосходят номинальных. В тех случаях, когда для исходных расчетов является график тока, потребляемого двигателем, то мощность средних цикловых потерь может быть подсчитана по методу эквивалентного тока

$$\Delta P_{\text{ср}} = k + u_{\text{н}} \left( \frac{I_{\text{ЭКВ}}}{I_{\text{н}}} \right)^2.$$

Номинальная мощность потерь определяется по формуле:  $\Delta P_{\text{н}} = k + u_{\text{н}}$ , где  $k$  - постоянные потери,  $u_{\text{н}}$  - переменные потери при номинальной нагрузке.

После подстановки этих значений  $\Delta P_{\text{ср}}$  и  $\Delta P_{\text{н}}$  получается условие, используемое в расчетах по методу эквивалентного тока:  $I_{\text{н}} > I_{\text{ЭКВ}}$ .

Исходя из вышеизложенных положений для построения защиты в качестве расчетного параметра используется также значение эквивалентного тока электродвигателя.

### Выводы

1. Аналитический анализ тепловых процессов в двигателе показывает, что для предупреждения развития аварий, в случае уменьшения сопротивлений обмоток, можно использовать контроль параметров пусковых режимов, которые не контролируются.
2. Результаты оценки влияния различных факторов показывают, что необходимо учитывать при разработке устройств защиты пусковые режимы АД для предупреждения развития аварий.

### Литература

1. Дубовик В.Г., Лебедев Л.Н. Разработка устройства защиты асинхронного электродвигателя на базе микропроцессора МК51. Деп. в ГНТБ Украины 12.05.2008 г., № 33 - Ук2008. 115 с.
2. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей. - М.: Энергоиздат, 1984, 240 с.
3. Муслин А.М. Аварийные режимы асинхронных электродвигателей и способы их защиты. - М.: Колос, 1979.
4. Воронин И.А., Лисецкий Н.В., Богдан А.В. Изменения величин и фаз токов при внутренних КЗ в АД. //Электротехника: Сб.науч. тр. - Алма-Ата: Каз. ПТИ. 1976 - Вып.3 -С.25-28.
5. Чиликин М.Г. Общий курс электропривода. - М.: Госэнергоиздат, 1963.
6. Гольдберг О.Д., Абдуллаев. Автоматизация контроля параметров и диагностика асинхронных двигателей. - М.: Энергоатомиздат. - 1991.