

КОНТРОЛЬ НАГРЕВА АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ТЕКУЩЕГО РЕЖИМА

Асинхронные электродвигатели (АЭД) с короткозамкнутым ротором являются основным типом электропривода переменного тока и потребляют свыше половины всей вырабатываемой электроэнергии. В связи с этим релейной защите этого типа привода уделяется большое внимание. В последнее время появилось большое количество микропроцессорных защит, в которых интегрированы большинство известных защит (токовая отсечка, защита от перегрузки током статора, защита минимального напряжения, защита от однофазных замыканий на землю в обмотке статора, защита от несимметрии питающего напряжения) [1,2].

Однако в этих терминалах в качестве защиты от перегрева двигателя используются преимущественно косвенные методы, основывающиеся на псевдотепловых моделях, на применении времятоковых характеристик, а также на применении термодатчиков, встраиваемых в обмотку статора. К недостаткам существующих защит от теплового перегрева следует отнести отсутствие контроля температуры нагрева ротора. В [3] предложен способ контроля температуры нагрева ротора в стационарных режимах по данным измерений токов, напряжений и скольжения. Однако для режимов пуска, наброса и сброса нагрузки и других динамических режимов данный способ требует соответствующей доработки.

Целью данной работы является дальнейшее совершенствование способа контроля нагрева короткозамкнутой обмотки ротора АЭД в динамических режимах по данным измерений мгновенных значений фазных токов и напряжений, а также скольжения.

Контроль температуры нагрева производится в реальном времени по данным измерений параметров текущего режима на основе определения активного сопротивления ротора и его сравнения с известным значением для холодного состояния и для текущего значения скольжения. Для повышения точности измерения температуры ротора в динамических режимах предложено определять сопротивление ротора из решения интегродифференциальных уравнений АЭД, описывающих его состояние. С этой целью дополнительно, по сравнению с [3], производятся измерения производных токов статора с помощью трансреакторов или с помощью численного дифференцирования мгновенных значений токов. В [4] изложен метод синтеза параметров эквивалентной схемы замещения АЭД (Рис.1.), в котором используются данные следующих опытов:

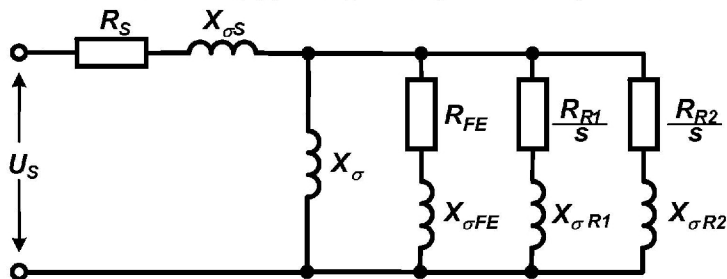


Рис.1. Схема замещения АЭД с короткозамкнутым ротором с двумя контурами на роторе и контуром потерь в стали.

ления взаимной индукции (X_{σ}), сопротивлений двух контуров ротора (R_{R1} , $X_{\sigma R1}$, R_{R2} , $X_{\sigma R2}$).

Принимаем схему замещения (Рис.1.) за исходную. Результаты предварительных операций (параметры схемы замещения, каталожные данные асинхронного электродвигателя) заносятся в блок постоянной памяти (блок констант) для последующего использования в процессе необходимых вычислений.

Алгоритм микропроцессорной защиты от тепловой перегрузки короткозамкнутого ротора АЭД состоит из следующих аналитических выражений и операций:

- измерение мгновенных значений фазных токов (i_a , i_b , i_c) и напряжений (u_a , u_b , u_c) статора двигателя;
- измерение производных фазных токов статора (pi_a , pi_b , pi_c) с помощью трансреакторов или численным способом

$$pi_i = \frac{1}{2 \cdot h} \cdot (3 \cdot i^n - 4 \cdot i^{n-1} + i^{n-2}), \quad (1)$$

где h – шаг съёма сигналов АЦП; n – текущая точка расчёта; i – мгновенное значение тока;

- вычисление скольжения s на основе дифференцирования измеренного с помощью датчика угла положения ротора γ ;
- измерение текущей температуры нагрева обмотки статора T_s с помощью тепловых датчиков (термосопротивлений), встроенных в обмотку статора электродвигателя и коррекция активного сопротивления обмотки статора АЭД R_s

$$R_{S,K} = R_S (1 + \alpha \cdot (T_S - T_S^{нар})), \text{ Ом}, \quad (2)$$

где α – температурный коэффициент равный для меди $0,004 \text{ 1}^{\circ}\text{C}$;

- вычисление результирующего активного сопротивления ротора $R_R^{исх}(s)$ для температуры начального (холодного) состояния машины $T_S^{нар}$ и текущего значения скольжения s

$$R_R^{исх}(s) = \frac{R_{R1} \cdot R_{R2} \cdot (R_{R1} + R_{R2}) + (R_{R1} \cdot X_{\sigma R2}^2 + R_{R2} \cdot X_{\sigma R1}^2) \cdot s^2}{(R_{R1} + R_{R2})^2 + (X_{\sigma R1} + X_{\sigma R2})^2 \cdot s^2} \cdot \frac{1}{s}; \quad (3)$$

- определение мгновенных значений фазных токов (i_a, i_b, i_c) и напряжений (u_a, u_b, u_c) в неподвижной системе координат α, β ($i_\alpha, i_\beta, u_\alpha, u_\beta$)

$$i_\alpha = \frac{2}{3} \cdot (i_a - \frac{i_b + i_c}{2}), \quad i_\beta = \frac{i_b - i_c}{\sqrt{3}}, \quad u_\alpha = \frac{2}{3} \cdot (u_a - \frac{u_b + u_c}{2}), \quad u_\beta = \frac{u_b - u_c}{\sqrt{3}}; \quad (4)$$

- определение напряжения ветви намагничивания в осях α, β

$$u_{\mu\alpha} = u_\alpha - R_{S,K} \cdot i_\alpha - X_{\sigma S} \cdot p i_\alpha, \quad u_{\mu\beta} = u_\beta - R_{S,K} \cdot i_\beta - X_{\sigma S} \cdot p i_\beta; \quad (5)$$

- определение тока контура потерь в стали (6) и тока ветви намагничивания (7) в осях α, β на основе численного решения дифференциальных уравнений методом Эйлера

$$i_{FE\alpha}^{n+1} = (u_{\mu\alpha} - R_{FE} \cdot i_{FE\alpha}^n) \cdot \frac{h}{X_{\sigma FE}} + i_{FE\alpha}^n, \quad i_{FE\beta}^{n+1} = (u_{\mu\beta} - R_{FE} \cdot i_{FE\beta}^n) \cdot \frac{h}{X_{\sigma FE}} + i_{FE\beta}^n, \quad (6)$$

$$i_{\mu\alpha}^{n+1} = u_{\mu\alpha} \cdot \frac{h}{X_{\sigma FE}} + i_{\mu\alpha}^n, \quad i_{\mu\beta}^{n+1} = u_{\mu\beta} \cdot \frac{h}{X_{\sigma FE}} + i_{\mu\beta}^n; \quad (7)$$

- определение тока, протекающего в короткозамкнутой обмотке ротора

$$i_{R\alpha} = i_\alpha - i_{FE\alpha} - i_{\mu\alpha}, \quad i_{R\beta} = i_\beta - i_{FE\beta} - i_{\mu\beta}; \quad (8)$$

- определение производной тока ротора ($p i_{R\alpha}, p i_{R\beta}$) численным способом по (1);

- вычисление активного сопротивления ротора в горячем состоянии для текущего значения скольжения

$$R_R^{гор}(s) = \frac{U_{\mu\beta} \cdot p i_{R\alpha} - U_{\mu\alpha} \cdot p i_{R\beta}}{i_{R\alpha} \cdot p i_{R\beta} - i_{R\beta} \cdot p i_{R\alpha}}; \quad (9)$$

- вычисление текущего значения температуры нагрева ротора АЭД

$$T_R = \left[\frac{R_R^{гор}(s) - R_R^{исх}(s)}{R_R^{исх}(s)} \cdot (235 + T_R^{нар}) + T_R^{нар} \right], \text{ }^{\circ}\text{C}. \quad (10)$$

Структурно-логическая схема защиты короткозамкнутого ротора АЭД от тепловой перегрузки показана на Рис.2.

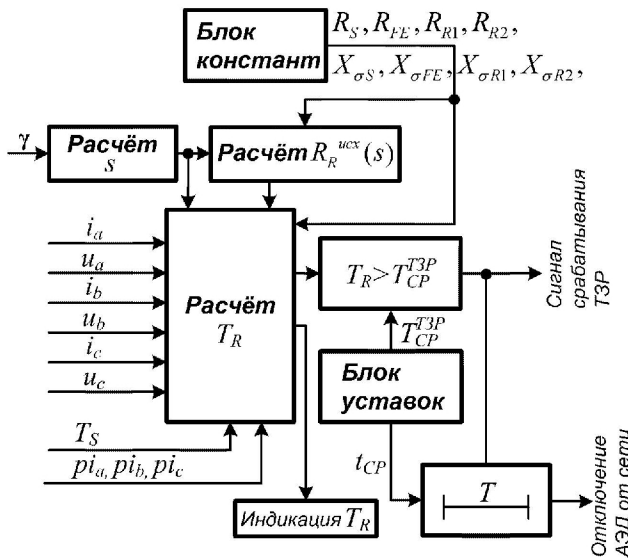


Рис.2. Структурно-логическая схема тепловой защиты короткозамкнутого ротора АЭД.

Текущее значение температуры нагрева ротора T_R в дальнейшем используется для цифровой индикации на мониторе, а также для защиты. После вычисления температуры ротора машины, рассчитанное значение направляется на вход блока уставок, где происходит его сравнение, с задаваемой в процессе наладки, уставкой срабатывания. В случае превышения уставки по температуре защита срабатывает, запуская выдержку времени и светозвуковую сигнализацию перегрева обмотки ротора. По истечении выдержки времени производится автоматическое отключение электродвигателя от питающей сети.

Пример моделирования работы тепловой защиты АЭД с короткозамкнутым ротором произведён для двигателя серии АВ ($P_{НОМ} = 630 \text{ кВт}$; $U_{НОМ} = 6 \text{ кВ}$; $I_{НОМ} = 92 \text{ А}$; $\eta_{НОМ} = 0,92 \text{ о.е.}$; $s_{НОМ} = 0,01 \text{ о.е.}$; $\cos\varphi_{НОМ} = 0,87$; $M_{II}/M_{НОМ} = 1,5 \text{ о.е.}$; $M_{МАКС}/M_{НОМ} = 2,5 \text{ о.е.}$; $I_{II}/I_{НОМ} = 5 \text{ о.е.}$). Параметры схемы замещения двигателя для температуры 75°C ($R_S = 0,01 \text{ о.е.}$; $X_{\sigma S} = 0,091 \text{ о.е.}$; $X_{\mu} = 2,73 \text{ о.е.}$; $R_{FE} = 0,012 \text{ о.е.}$; $X_{\sigma FE} = 0,153 \text{ о.е.}$; $R_{R1} = 0,012 \text{ о.е.}$; $X_{\sigma R1} = 0,01 \text{ о.е.}$; $R_{R2} = 0,165 \text{ о.е.}$;

$X_{\sigma R2} = 0,112 \text{ о.е.}$) рассчитаны по методике согласно [4]. Для математического моделирования использовались методы, изложенные в [5].

При моделировании режима пуска и наброса нагрузки по рассчитанным данным тепловых потерь задавалась температура V_R нагрева ротора АЭД, в функции от которой изменялись активные сопротивления ротора. Совпадение найденной по разработанному методу (1) – (10) температуры нагрева ротора T_R с V_R является критери-

ем правильности предложенного алгоритма. Результаты моделирования указанных режимов пуска и наброса нагрузки на АЭД показаны на Рис.3 в виде осциллограмм тока статора фазы А и его производной, электромагнитного момента (Me) и момента сопротивления (Mc), частоты вращения ротора и температур нагрева ротора (T_R и V_R) от времени.

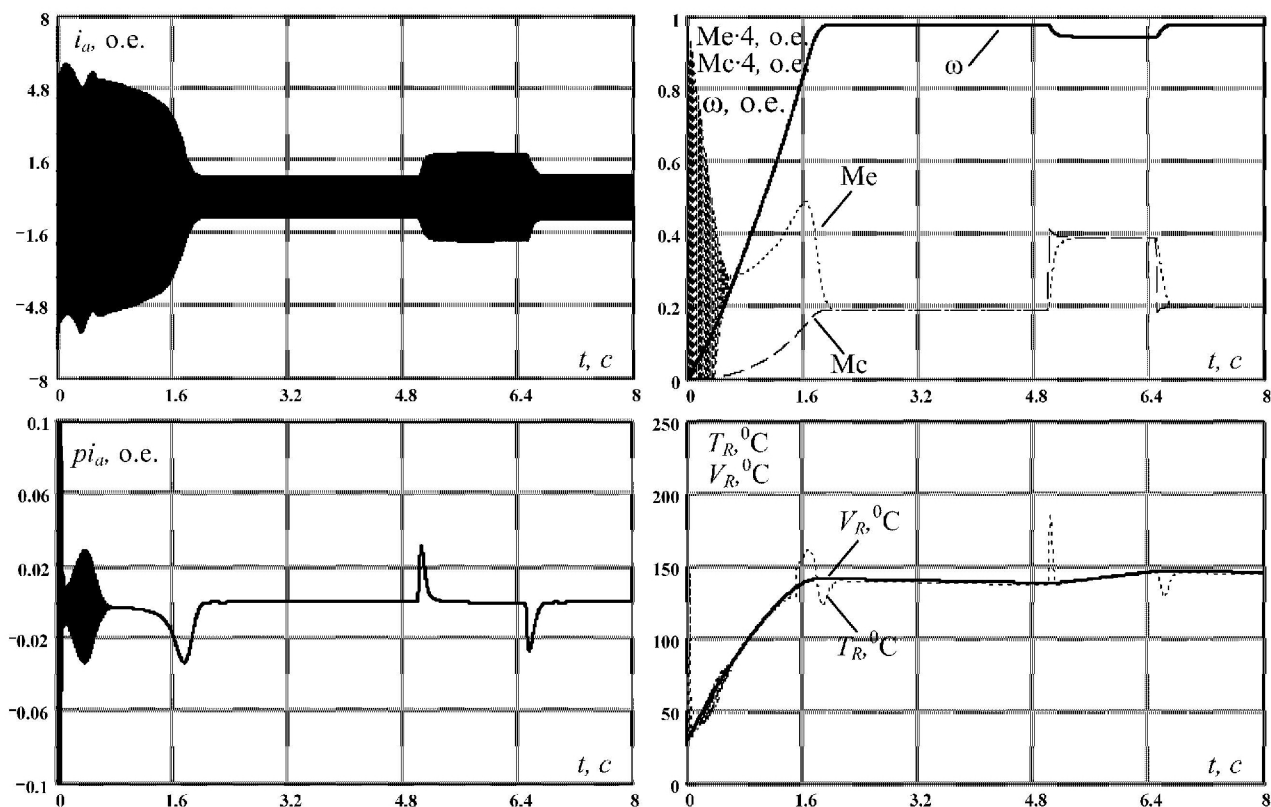


Рис.3. Результаты определения температуры нагрева ротора АЭД в режимах пуска и наброса нагрузки.

Как следует из Рис.3, найденные с помощью методики (1) – (10) значения температуры нагрева обмотки ротора практически полностью совпадают с исходными за исключения моментов времени, где абсолютные значения производной тока статора превышают 0,02 о.е. При построении тепловой защиты ротора можно ввести соответствующую блокировку по производной тока статора.

Вывод. Разработан метод определения температуры нагрева короткозамкнутого ротора АЭД по данным измерений параметров текущего режима, который может быть реализован с помощью микропроцессорных устройств. Работоспособность алгоритма подтверждена результатами моделирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Правила устройства электроустановок/ Минэнерго СССР. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 640 с.
2. Андреев В.А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения: Учеб. для вузов. 4-е изд. Перераб. и доп. – М.:Высш. Шк., 2006. – 639 с.
3. Сивокобыленко В.Ф., Ткаченко С.Н. Микропроцессорная защита от тепловой перегрузки асинхронного электродвигателя. Наук.-приклад. журнал «Технічна електродинаміка». Тематич. Вип. «Проблеми сучасної енергетики». Част.1: Київ: Інститут електродинаміки, Націон. Академ. наук України, 2008, С. 47-52.
4. Сивокобыленко В.Ф., Ткаченко С.Н. Математическое моделирование характеристик асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором с учётом потерь в стали. Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія «Електротехніка і енергетика», вип. 7 (128): Донецьк: ДВНЗ «ДонНТУ», 2007, С. 126-131.
5. Сивокобыленко В.Ф., Лебедев В.К. Переходные процессы в системах электроснабжения собственных нужд электростанций. Учеб. пособие, Донецк, ДонНТУ, 2002. – 136 с.