

УДК 621.313

В.Ф. СИВОКОБЫЛЕНКО (д-р техн. наук, проф.), **С.Н. ТКАЧЕНКО** (канд.техн.наук)

Государственное высшее учебное заведение
«Донецкий национальный технический университет»
svf@elf.dgtu.donetsk.ua, tsn1981@mail.ru

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МИКРОПРОЦЕССОРНОЙ ТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ КОРОТКОЗАМКНУТЫХ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Для тепловой защиты асинхронных электродвигателей по результатам измерений параметров текущего режима для неизвестной температуры и базового замера при известной находят из эквивалентной схемы замещения значения изменения активного сопротивления обмотки ротора, по которому определяют температуру нагрева. Для алгоритма защиты предложен метод учёта зависимостей сопротивлений схемы замещения от явлений эффекта вытеснения тока и насыщения магнитных цепей. Эффективность защиты проверена результатами математического моделирования и экспериментов в лабораторных условиях.

Асинхронный электродвигатель, тепловая защита, эффект вытеснения тока, насыщение магнитных цепей, эквивалентная схема замещения, параметры текущего режима.

Постановка задачи. Одним из самых распространённых типов электрических машин переменного тока, применяемых в качестве электропривода механизмов промышленных предприятий, являются асинхронные электродвигатели (АЭД) с короткозамкнутым ротором (КЗР). Несмотря на простоту конструкции и эксплуатации повреждаемость данного типа машин составляет примерно 20-25 % за год от общего количества эксплуатируемых двигателей [1]. Применяемые в настоящее время устройства релейной защиты и противоаварийной автоматики (РЗА), как с использованием цифровой, так и электромеханической базы, не позволяют защитить АЭД в ряде аварийных и аномальных режимах работы, сопровождающихся превышением температуры нагрева обмоток статора и КЗР свыше допустимых значений. К таким режимам относятся: работа при несимметрии питающего напряжения, при неисправности системы охлаждения, многократные пуски и др. Для снижения затрат на ремонтно-восстановительные работы АЭД актуальным является совершенствование тепловой защиты.

Анализ исследований и публикаций. Исходя из анализа применяемых в настоящее время цифровых устройств РЗА АЭД, проведенного в [2], можно сделать вывод о том, что в большинстве терминалов используется незначительно модернизированная стандартная защитная логика, рекомендуемая ПУЭ [3] или стандартом IEEE [4]. Как справедливо отмечено в [2], наиболее перспективной защитой от тепловой перегрузки (ЗТП) является подход, изложенный в [5], в котором величина температуры нагрева ротора вычисляется косвенно по данным определения активного сопротивления на основе замеров фазных токов, напряжений и скольжения. Особенности данной ЗТП является её адаптация для работы в сетях с несимметрией питающего напряжения, учёт скин-эффекта в обмотке КЗР и потерь в стали статора. Однако в используемой в ЗТП эквивалентной схеме замещения (ЭСЗ) не учитывается явление насыщения главного магнитного потока и потоков рассеяния, что вносит некоторую погрешность при определении температуры.

Цель статьи. Совершенствование алгоритма цифровой тепловой защиты ширококопанных АЭД путём установления зависимости параметров эквивалентной схемы замещения от явлений насыщения магнитных потоков и вытеснения тока.

Результаты исследований. В работе предлагается использование ЭСЗ для ЗТП ширококопанных АЭД, показанную на рис. 1., в которой учитывается влияние эффекта вытеснения тока в обмотке КЗР, учитываются потери в стали статора и учитываются насыщение главного магнитного потока и потоков рассеяния, а также зависимости активных сопротивлений от температуры нагрева. Учёт указанных явлений на соответствующие сопротивления ЭСЗ будем производить с помощью поправочных коэффициентов, зависящих от температуры нагрева (K_V), токов (K_i) и скольжения (K_s) (рис. 1). Зависимость активных сопротивлений схемы замещения от температуры нагрева (V) учитывается с помощью известной формулы (1).

$$R(V) = R(V_0) \cdot K_V(V); \quad K_V(V) = \frac{(1 + \alpha \cdot V)}{(1 + \alpha \cdot V_0)}, \quad (1)$$

где V – текущее значение температуры нагрева, $^{\circ}\text{C}$; α – температурный коэффициент проводника, $1/^{\circ}\text{C}$; V_0 – значение температуры нагрева в холодном (начальном состоянии), $^{\circ}\text{C}$; $R(V)$ – функциональная зависимость активного сопротивления от температуры V , о.е.

В дальнейшем все величины будем представлять в системе относительных единиц (о.е.). Для индуктивных сопротивлений рассеяния статора ($X_{\sigma s}$) и ротора ($X_{\sigma r}$) учитывается их зависимость от соответствующих токов (I_s и I_r),

а для сопротивления взаимоиндукции машины (X_{μ}) от тока намагничивания (I_{μ}).

© Сивокобыленко В.Ф., Ткаченко С.Н., 2011

Для учёта потерь в стали статора в ЭСЗ, как и в [2,5], используется короткозамкнутый контур (R_{fe} , $X_{\sigma fe}$), в котором $X_{\sigma fe}$ принимается приблизительно равным X_{μ} , а активное сопротивление R_{fe} является функциональной зависимостью от температуры нагрева обмотки статора V_s .

Для учёта влияния эффекта вытеснения тока на активное и индуктивное сопротивления обмотки короткозамкнутого ротора последние представим в виде функциональных зависимостей от скольжения, в которых вытеснение тока учитывается с помощью коэффициентов вытеснения $Kr(s)$ и $Kx(s)$.

$$R_r(s) = Kr(s) \cdot R_{r0}; \quad Kr(s) = 1 + \frac{a_1 \cdot s + a_2 \cdot s^2}{R_{r0}};$$

$$X_{\sigma r}(s) = Kx(s) \cdot X_{\sigma r0}; \quad Kx(s) = 1 + \frac{b_1 \cdot s + b_2 \cdot s^2}{X_{\sigma r0}},$$
(2)

где R_{r0} , $X_{\sigma r0}$ – активное и индуктивное сопротивления обмотки короткозамкнутого ротора при скольжении $s \approx 0$; a_1 , a_2 , b_1 , b_2 , – коэффициенты аппроксимирующего квадратичного полинома, значения которых могут быть найдены по результатам расчётов коэффициентов вытеснения для известной формы паза по методике [6].

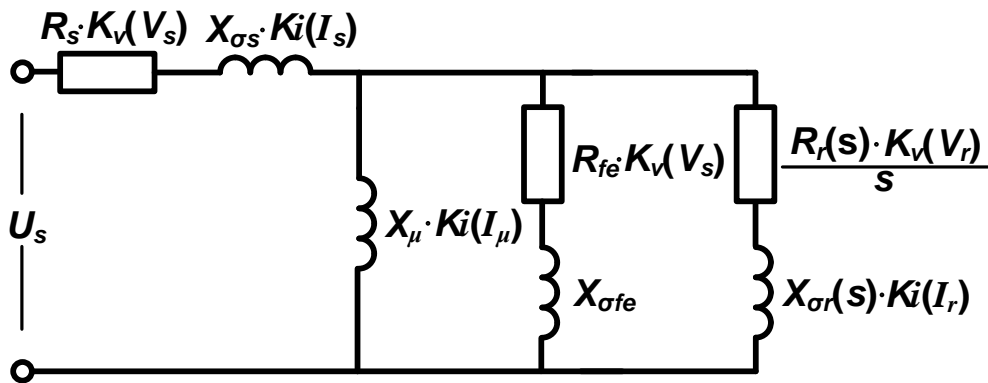


Рисунок 1 – Одноконтурная схема замещения асинхронного электродвигателя с контуром потерь в стали статора, учётом скин-эффекта и насыщения

Влияние насыщения магнитных потоков на индуктивные сопротивления $X(I)$ учтём с помощью коэффициента $Ki(I)$, аналитическое выражение для которого получено в [7] по данным расчётно-экспериментальных исследований.

$$X(I) = Ki(I) \cdot X_{i \hat{i} \hat{i}}, \quad Ki(I) = \frac{\lambda - (\lambda - 1) \cdot e^{[(I)^n \cdot (\lambda - 1)]}}{\lambda - (\lambda - 1) \cdot e^{(\lambda - 1)}},$$
(3)

где I – кратность текущего значения тока по отношению к номинальному значению статора, ротора или холостого хода; $X_{НОМ}$ – ненасыщенное значение сопротивления при токах меньших или равных номинальному; n – показатель степени, который для АЭД обычно равный 1-2; λ – коэффициент, определяющий степень насыщения магнитных потоков машины, и рассчитываемый по (4).

$$\lambda = X_{BX}^{i \lambda \tilde{N}} / X_{BX}^{i \hat{A} \tilde{N}}$$
(4)

где X_{BX}^{HAC} – значение входного индуктивного сопротивления рассеяния машины, в насыщенном состоянии получаемое из опыта подачи на статор напряжения, близкого к номинальному (6-10 кВ) при заторможенном роторе ($s = 1$), Ом; $X_{BX}^{HEHAC} = X$ – значение входного индуктивного сопротивления рассеяния в ненасыщенном состоянии, получаемое из опыта подачи на статор пониженного напряжения (0,4 кВ) при заторможенном роторе ($s = 1$), Ом.

Характер зависимости коэффициента λ от величины тока I , при разных показателях степени насыщения ($n = 1$; $n = 1,5$; $n = 2$) для $\lambda = 0,65$ и $0,85$ показан на рис. 2., который подтверждает универсальность зависимости (3) для АЭД с КЗР с любой степенью насыщения магнитных цепей.

Рассмотрим способ определения параметров избранной ЭСЗ ЗТП асинхронных электродвигателей на основе использования известных экспериментальных или каталожных данных: номинальных значений активной мощности на валу ($P_{НОМ}$), напряжения ($U_{НОМ}$), тока статора ($I_{НОМ}$), коэффициента мощности ($\cos \varphi_{НОМ}$), коэффициента полезного действия ($\eta_{НОМ}$), частоты вращения (скольжения) ($n_{НОМ}$, ($s_{НОМ}$)), кратностей пускового тока статора ($I_P = I_{П}/I_{НОМ}$), момента ($M_P = M_{П}/M_{НОМ}$) при $s = 1$, максимального момента ($M_{МАХ} = M_{МАКС}/M_{НОМ}$), минимальных тока статора ($I_{МИН} = I_{МИН}/I_{НОМ}$) и момента ($M_{МИН} = M_{МИН}/M_{НОМ}$) при скольжении $s_{МИН}$.

Искомые параметры схемы замещения являются функциями токов статора, ротора и контура намагничивания, температуры нагрева статора (V_s), а также скольжения:

$$Z_s(I_s, V_s) = R_s \cdot K_V(V_s) + j \cdot Ki(I_s) \cdot X_{\sigma s}; \quad Z_\mu(I_\mu) = j \cdot Ki(I_\mu) \cdot X_\mu; \quad (5)$$

$$Z_{fe}(V_s) = R_{fe} \cdot K_V(V_s) + j \cdot X_{\sigma fe}; \quad Z_r(I_r, V_r) = \frac{R_{r0} \cdot K_V(V_r) \cdot Kr(s_r)}{s} + j \cdot Ki(I_r) \cdot Kx(s) \cdot X_{\sigma r};$$

Вектор искомым параметров представим как

$$B = [R_s, X_{\sigma s}, X_\mu, R_{fe}, X_{\sigma fe}, R_{r0}, X_{\sigma r0}, a_1, a_2, b_1, b_2,]^{tr}. \quad (6)$$

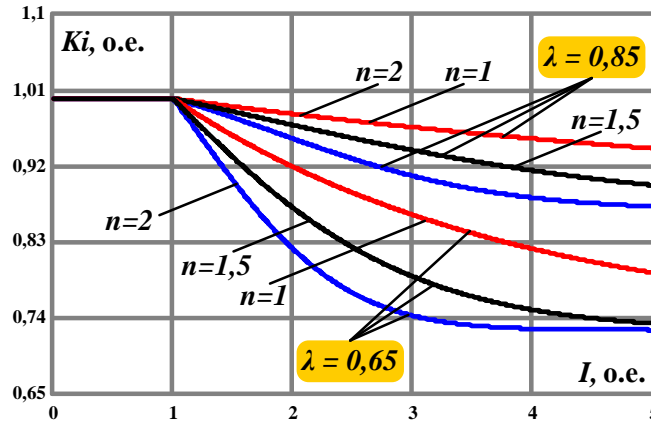


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента Ki от величины тока I при разных значениях n и λ

Активное сопротивление обмотки статора может быть найдено путём его замеров. При отсутствии экспериментальных данных его можно принять равным $1-1,5 \cdot s_{НОМ}$. Сопротивление ветви намагничивания определяем из опыта холостого хода. Ненасыщенное индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора ($X_{\sigma s}$) находим из опыта подачи на статор пониженного напряжения при заторможенном роторе ($s = 1$) по (7).

$$X_{\sigma s} = \frac{X_{BX}^{f \Delta I \Delta \tilde{N}}}{2}, \quad X_{\sigma s}^{f \Delta \tilde{N}} = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\left[\frac{U_s}{\sqrt{3} \cdot I_s} \right]^2 - \left[\frac{P_s}{\sqrt{3} \cdot I_s^2} \right]^2}, \quad (7)$$

где X_{BX}^{HEHAC} – ненасыщенное входное индуктивное сопротивление, о.е.; X_{BX}^{HAC} – насыщенное входное индуктивное сопротивление, о.е.; U_s, I_s – напряжение и ток статора, о.е.; P_s – активная мощность АЭД, о.е.

Из этого опыта, как уже ранее было отмечено, определяем коэффициент степени насыщения λ по (3).

Используя методы минимизации, например метод Ньютона первого порядка, находим значения искомым параметров из решения системы нелинейных уравнений и неравенств (8).

$$\begin{cases} M_{i \dot{i} \dot{i}}^{\dot{e} \dot{n} \dot{o}} - M_{i \dot{i} \dot{i}}^{\dot{o} \dot{\Delta} \dot{n} \dot{z}}(U_s, B, s_{НОМ}) = 0; \\ I_{i \dot{i} \dot{i}}^{\dot{e} \dot{n} \dot{o}} - I_{i \dot{i} \dot{i}}^{\dot{o} \dot{\Delta} \dot{n} \dot{z}}(U_s, B, s_{НОМ}) = 0; \\ M_p^{\dot{e} \dot{n} \dot{o}} - M_p^{\dot{o} \dot{\Delta} \dot{n} \dot{z}}(U_s, B, s = 1) = 0; \\ I_p^{\dot{e} \dot{n} \dot{o}} - I_p^{\dot{o} \dot{\Delta} \dot{n} \dot{z}}(U_s, B, s = 1) = 0; \\ M_{MAX}^{\dot{e} \dot{n} \dot{o}} - M_{MAX}^{\dot{o} \dot{\Delta} \dot{n} \dot{z}}(U_s, B, s_{KP}) = 0; \\ I_{MIN}^{\dot{e} \dot{n} \dot{o}} - I_{MIN}^{\dot{o} \dot{\Delta} \dot{n} \dot{z}}(U_s, B, s_{i \dot{e} \dot{i}}) = 0; \\ M_{MIN}^{\dot{e} \dot{n} \dot{o}} - M_{MIN}^{\dot{o} \dot{\Delta} \dot{n} \dot{z}}(U_s, B, s_{i \dot{e} \dot{i}}) = 0; \\ \eta_{i \dot{i} \dot{i}}^{\dot{e} \dot{n} \dot{o}} - \frac{M_{i \dot{i} \dot{i}}^{\dot{o} \dot{\Delta} \dot{n} \dot{z}}(U_s, B, s)}{M_{i \dot{i} \dot{i}}^{\dot{o} \dot{\Delta} \dot{n} \dot{z}}(U_s, B, s) + \Delta \mathcal{D}_{i \dot{i} \dot{i}}^{\dot{o} \dot{\Delta} \dot{n} \dot{z}}(U_s, B, s)} = 0; \\ R_s > 0; X_{\sigma s} > 0; X_\mu > 0; R_{fe} > 0; X_{\sigma fe} > 0; R_{r0} > 0; X_{\sigma r0} > 0, \end{cases} \quad (8)$$

где $I_s(U_s, B, s)$ – функция тока статора определяется как

$$I_s(U_s, B, s) = \frac{U_s}{Z_{BX}(U_s, B, s)}, \quad (9)$$

где $Z_{BX}(U_s, B, s) = Z_s(I_s, V_s) + [(Z_r(I_r, V_r))^{-1} + (Z_\mu(I_\mu))^{-1} + (Z_{fe}(V_s))^{-1}]^{-1}$ – входное полное сопротивление АЭД.

Функция асинхронного момента машины определяется как

$$M(U_s, B, s) = I_s^2 \cdot R_{BX} - \Delta P_s - \Delta P_{fe} - \Delta P_r. \quad (10)$$

где потери в обмотке статора: $\Delta P_s = (|I_s|)^2 \cdot R_s$, потери в обмотке короткозамкнутого ротора: $\Delta P_r = (|I_r|)^2 \cdot R_r(s)$,

потери в стали статора: $\Delta P_{fe} = (|I_{fe}|)^2 \cdot R_{fe}$.

В системе нелинейных уравнений и неравенств (8) на каждом шаге расчёта производим численное решение функций тока статора (9) и асинхронного момента (10) электродвигателя методом итераций.

В соответствии с изложенной методикой, найденные базовые значения параметров (вектор B) при заданной температуре используются в алгоритме ЗТП АЭД. Схема данного алгоритма представлена на рис. 3. Её функционирование заключается в следующем. Производится измерение параметров текущего режима (мгновенные значения фазных токов и напряжений статора, скольжения, температуры нагрева статора (с помощью термодатчиков (ТД) обмотки статора). Дискретность измерений за каждый период промышленной частоты составляет 10-20 точек (рис. 3, блок 1). На основе замеров определяются составляющие прямой последовательности (ПП) мощности (P_I), обобщённых векторов тока ($I_{s,l}$) и напряжения ($U_{s,l}$) (рис. 3, блок 2). По этим данным вычисляются входные активное и индуктивное сопротивления (рис. 3, блок 3), и после коррекции активных сопротивлений статора и контура потерь в стали от температуры нагрева статора (рис. 3, блок 4) вычисляется напряжение на ветви намагничивания и определяется методом итерации ток ветви намагничивания (рис. 3, блок 5,6). После описанных вычислительных операций, определяется температура нагрева КЗР (рис. 3, блоки 8-10).

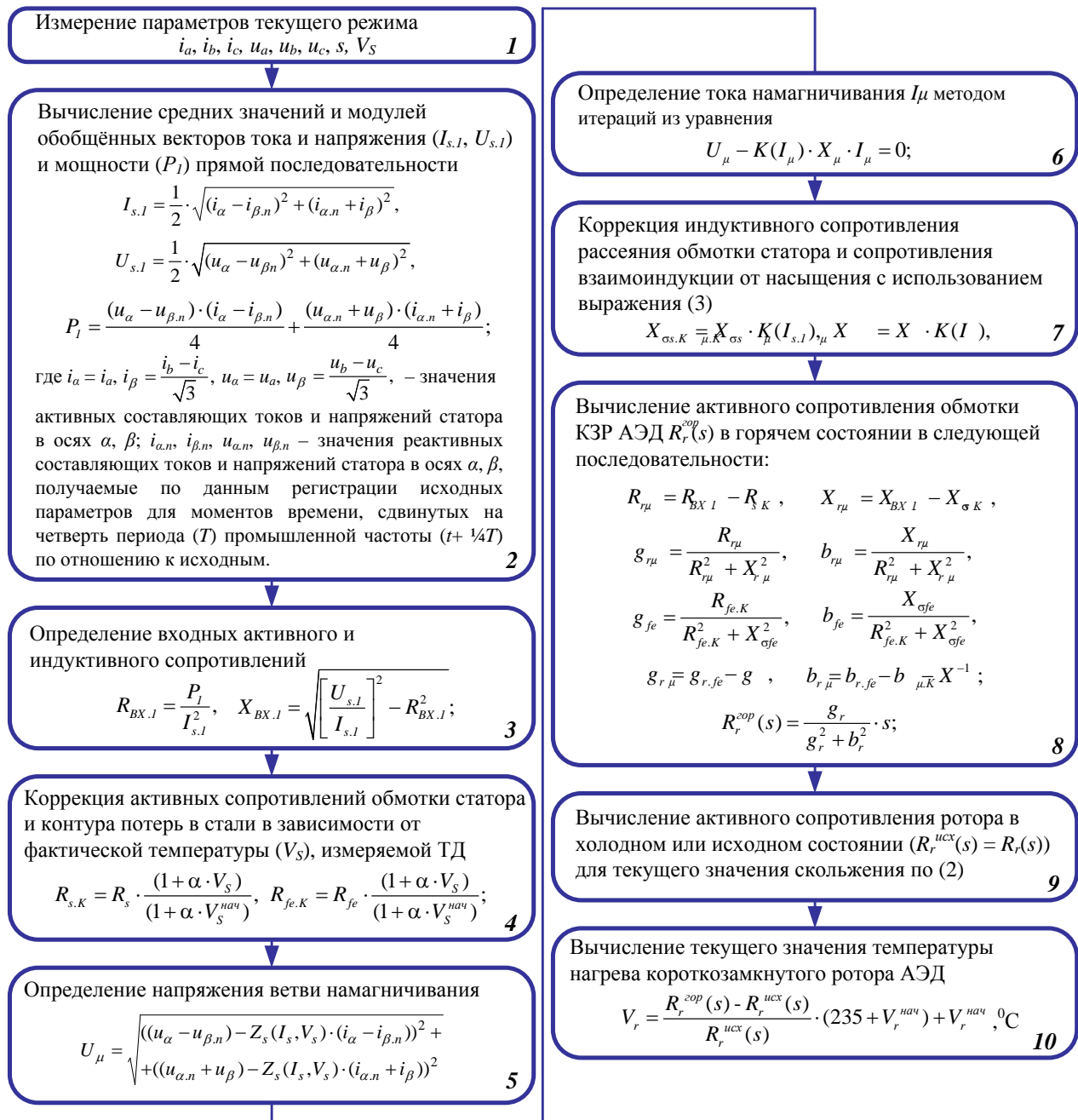


Рисунок 3 – Последовательность операций за один такт работы микроконтроллера алгоритма ЗТП АЭД с КЗР

Для проверки работоспособности предложенного метода были определены параметры эквивалентной схемы замещения для АЭД с КЗР типа ДАЗО-1910-12У1 номинальной мощностью 1700 кВт и номинальным

напряжением статора 6 кВ, являющегося электроприводом дымососа типа ДОД-31,5 на пылеугольных энергоблоках тепловых электрических станций мощностью 300 МВт. Каталожные данные для этого асинхронного электродвигателя представлены в табл.1.

Таблица 1 – Каталожные данные асинхронного электродвигателя типа ДАЗО-1910-12У1

$P_{НОМ}$, кВт	$U_{НОМ}$, кВ	$I_{НОМ}$, А	$\cos\varphi_{НОМ}$	$\eta_{НОМ}$	$M_{П}/M_{НОМ}$	$M_{МАКС}/M_{НОМ}$	$I_{П}/I_{НОМ}$	$I_{МИН}/M_{НОМ}$	$M_{МИН}/M_{НОМ}$	$s_{МИН}$	$s_{НОМ}$
1700	6	216,72	0,8	0,9435	0,8	2,25	4,5	4,3	0,7	0,5	0,008

Рассчитанные параметры ЭСЗ данного электродвигателя представлены в табл.2. Квадратичные функциональные зависимости активного и индуктивного сопротивлений обмотки короткозамкнутого ротора от скольжения для АЭД типа ДАЗО-1910-12У1 показаны на рис.4. Коэффициент λ для этой машины равен 0,65.

Таблица 2 – Параметры ЭСЗ асинхронного электродвигателя типа ДАЗО-1910-12У1

R_s	$X_{\sigma s}$	X_{μ}	R_{fe}	$X_{\sigma fe}$	R_{r0}	$X_{\sigma r0}$	a_1	a_2	b_1	b_2
0,016	0,119	2,751	59,045	3,009	0,015	0,166	0,028	-0,01	-0,011	-0,021

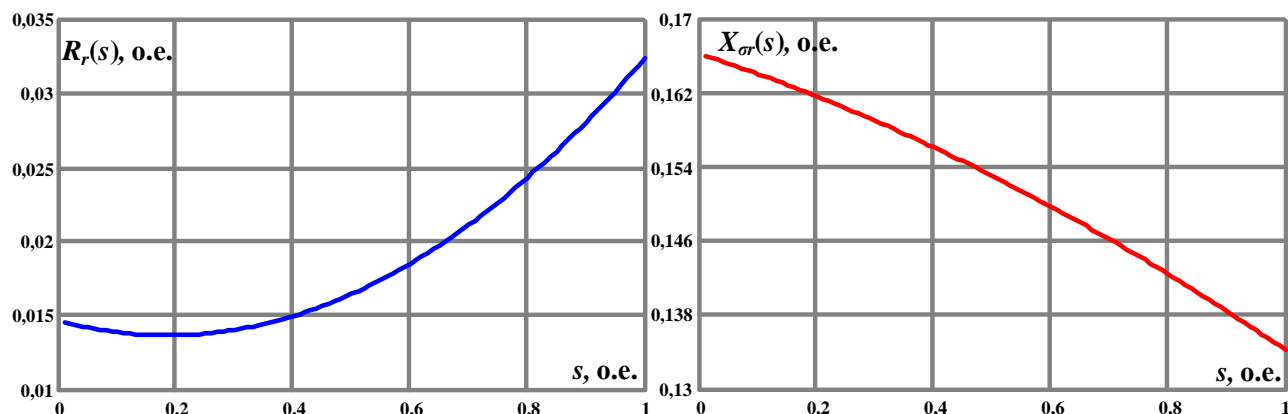


Рисунок 4 – Функциональные зависимости сопротивлений ротора от скольжения

Работоспособность алгоритма ЗТП с АЭД КЗР проверена на ПЭВМ с использованием методов математического моделирования [8]. Использовалась математическая модель асинхронного электродвигателя на основе полных дифференциальных уравнений [5], с учётом насыщения и использованием квадратичных зависимостей от скольжения сопротивлений обмотки ротора.

С целью проверки работоспособности предложенной ЗТП АЭД принимался закон изменения температуры обмотки короткозамкнутого ротора (V_r^*) на основе решения уравнения (11).

$$\frac{dV_r^*}{dt} = \frac{2}{P_{НОМ} \cdot T_a} \cdot M(t) \cdot s(t), \quad R_r(s, V_r^*) = R_r(s) \frac{(1 + \alpha \cdot V_r)}{(1 + \alpha \cdot V_r^{t_{нач}})}, \quad (11)$$

где M – текущее расчетное значение электромагнитного момента на валу; s – текущее значение скольжения; T_a – постоянная времени агрегата, с, t – время, с, $V_r^{нач}$ – начальное значение температуры нагрева ротора, $^{\circ}\text{C}$.

В модели в функции от V_r^* изменялось активное сопротивление роторного контура ($R_r(s, V_r^*)$). В задачу алгоритма тепловой защиты входило определение указанной температуры нагрева обмотки короткозамкнутого ротора. Совпадение найденной по предложенному методу температуры нагрева КЗР V_r с V_r^* являлось критерием корректной работы алгоритма ЗТП.

В качестве примера промоделирован режим пуска, работы под нагрузкой и заклинивания вала для ранее упомянутого АЭД типа ДАЗО-1910-12У1 с медной короткозамкнутой обмоткой на роторе.

Зависимости мгновенных значений тока статора фазы А, модуля тока прямой последовательности, угловой частоты вращения и температуры нагрева обмотки КЗР показаны на рис. 5. Как видно, что величина температуры, рассчитанная по модернизированному алгоритму тепловой защиты практически полностью обрабатывает заданный закон изменения температуры (11).

Изложенный алгоритм ЗТП был реализован на базе микропроцессорной платформы L-Card L-783, и его действие было проверено в лабораторных условиях на асинхронном электродвигателе типа АИР-112-М4 мощностью 5,5 кВт и напряжением статора 0,4 кВ. Предварительно для этого АЭД были определены параметры по методике [9] и по предложенной в данной работе методике с учётом насыщения. В эксперименте

нагрев машины производился в режиме подачи напряжения на статор при заторможенном роторе ($s = 1$). Отклонение температуры нагрева ротора от замеренной с помощью ТД составило 2-3 °С, тогда как при использовании в алгоритме ЗТП определённых по [9] параметров отклонение температуры достигало 8-10 °С.

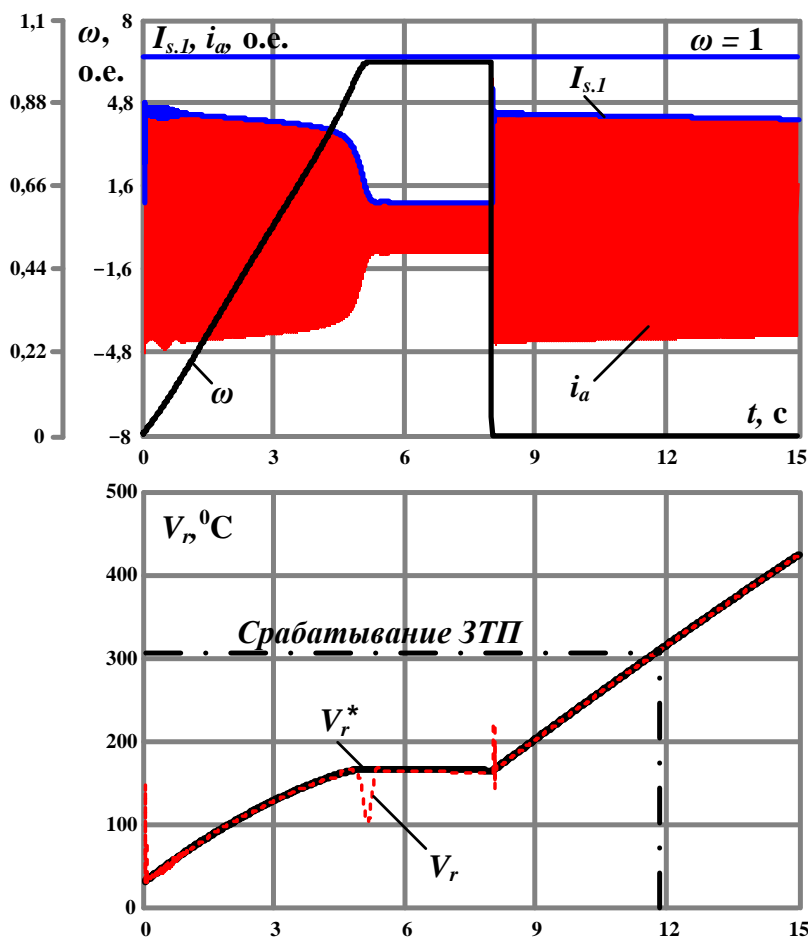


Рисунок 5 – Зависимости тока фазы А статора, модуля тока прямой последовательности, угловой частоты вращения и температуры нагрева ротора АЭД типа ДАЗО-1910-12У1

В результате проведенных исследований можно сделать заключение о целесообразности применения данной ЗТП в системе собственных нужд электростанций, где используются широкодиапазонные асинхронные электродвигатели большой мощности.

Выводы.

1. Предложен усовершенствованный алгоритм тепловой защиты асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором, основанный на косвенном расчёте температуры нагрева ротора с учётом насыщения главного магнитного потока и потоков рассеяния, вытеснения тока и потерь в стали. Вычисление температуры нагрева производится в реальном времени путём расчёта активного сопротивления ротора и его сравнения с известным значением для холодного состояния на основе измерения мгновенных значений фазных токов и напряжений, скольжения и температуры нагрева обмотки статора.

2. Для учёта влияния эффекта вытеснения тока на активное и индуктивное сопротивления обмотки короткозамкнутого ротора предложено представлять их в виде суммы зависимых и независимых составляющих этих сопротивлений от скольжения. Зависимые составляющие аппроксимируются с помощью квадратичных полиномов.

3. Предложенный алгоритм ЗТП реализован в виде математической модели для современной ПЭВМ, состоящей из модели самого АЭД с КЗР и рассмотренной защиты. Совпадение величины температуры, рассчитанной по алгоритму ЗТП со значением, определённым по заданному закону подтверждает корректную работу усовершенствованной тепловой защиты короткозамкнутых асинхронных электродвигателей.

4. Проверка усовершенствованного алгоритма ЗТП проверена также в лабораторных условиях на асинхронном электродвигателе типа АИР-112-М4. В эксперименте нагрев машины производился в режиме подачи напряжения на статор при заторможенном роторе. Отклонение температуры нагрева ротора от замеренной с помощью ТД составило 2-3 °С, тогда как при использовании в алгоритме защиты определённых по [9] параметров отклонение температуры достигало 8-10 °С.

4. В работе рекомендовано применение усовершенствованной ЗТП в системе собственных нужд электростанций, где используются широкодиапазонные асинхронные электродвигатели большой мощности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Корогодский В.И. Релейная защита электродвигателей напряжением выше 1 кВ / С.Л. Кужеков, Л.Б. Паперно. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 248 с.
2. Сивокобыленко В.Ф. Тепловая защита асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при несимметрии питающего напряжения / В.Ф. Сивокобыленко, С.Н. Ткаченко // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені М. Остроградського. – Випуск 3/2009 (56). – Ч. 2. – Кременчук: КДПУ, 2009. – С. 74-78.
3. Правила устройства электроустановок / Минэнерго СССР. – [6-е изд., перераб. и доп.] – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 640 с.
4. IEEE Guide for AC Motor Protection IEEE Std C37.96-2000. Revision of IEEE Std C37.96-1988 / IEEE Power Engineering Society – Approved 30 March 2000. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. Copyright © 2000 by the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.
5. Сивокобыленко В.Ф. Моделирование алгоритма тепловой защиты короткозамкнутого ротора асинхронного электродвигателя / В.Ф. Сивокобыленко, С.Н. Ткаченко // Вісник національного університету «Львівська політехніка». «Електроенергетичні та електромеханічні системи». – № 654. – Львів, 2009. – С. 203–209.
6. Вольдек А.И. Электрические машины. Машины переменного тока [Учебник для вузов.] / А.И. Вольдек, В.В. Попов – СПб.: Питер, 2007. – 350 с.
7. Сивокобыленко В.Ф. Математическое моделирование электродвигателей собственных нужд электрических станций / Сивокобыленко В.Ф., Костенко В.И. – Донецк, ДПИ, 1979. – 110 с.
8. Сивокобыленко В.Ф. Переходные процессы в системах электроснабжения собственных нужд электростанций [Уч. Пособие] / Сивокобыленко В.Ф., Лебедев В.К. – Донецк, ДонНТУ, 2002. – 136 с.
9. Сивокобыленко В.Ф. Математическое моделирование характеристик асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором с учётом потерь в стали / В.Ф. Сивокобыленко, С.Н. Ткаченко // Збірник наукових праць ДВНЗ «Донецький національний технічний університет». Серія «Електротехніка і енергетика». – випуск 7 (128). – Донецьк: ДонНТУ, 2007. – С. 126-131.

Надійшла до редколегії 08.04.2011

Рецензент: Є.Б. Ковальов

В.Ф. СИВОКОБИЛЕНКО, С.М. ТКАЧЕНКО
Державний вищий навчальний заклад
«Донецький національний технічний університет»

V. SIVOKOBYLENKO, S. TKACHENKO
State Institution of Higher Education
«Donetsk National Technical University»

Удосконалення мікропроцесорною теплового захисту короткозамкнених асинхронних электродвигунів Для теплового захисту асинхронних электродвигунів за результатами вимірів параметрів поточного стану для невідомої температури і базового виміру при відомій знаходять з еквівалентної заступної схеми значення зміни активного опору обмотки ротора, по якому визначають температуру нагріву. Для алгоритму захисту запропонований метод обліку залежностей опорів заступної схеми від явищ ефекту витіснення струму і насичення магнітних кіл. Ефективність захисту перевірена результатами математичного моделювання і експериментів у лабораторних умовах.

Асинхронний электродвигун, тепловий захист, ефект витіснення струму, насичення магнітних кіл, еквівалентна заступна схема, параметри поточного стану.

Improvement of Microprocessor Thermal Protection of Short-circuited Induction Motors. For thermal protection of induction motors, based on condition parameter measuring for an unknown temperature and base measuring at known temperature from an equivalent scheme for the value of change of pure resistance of rotor on which determine the temperature of heating.

For the protection algorithm, we propose the method of allowing dependences of substitution scheme resistances from the skin-effect and magnetic chains saturation. Effectiveness of the protection checked by the results of mathematical modeling and experiments in the laboratory.

Induction motor, thermal protection, skin-effect, saturation of magnet fluxes, equivalent scheme, condition parameters.