

УДК 621.313

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ
НИЗКОВОЛЬТНЫХ АСИНХРОННЫХ МАШИН С
КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ**

С.Н. Ткаченко, А.В. Коваленко, В.А. Киселёв
ГОУВПО «Донецкий Национальный Технический Университет»

Работа посвящена совершенствованию тепловой защиты низковольтных асинхронных машин с короткозамкнутым ротором, на основе контроля эквивалентной температуры нагрева по данным определения входного активного сопротивления прямой последовательности в холодном и горячем состояниях. Вычисление входных сопротивлений осуществляется на основе измерения фазных токов и напряжений, а также величины скольжения. Работоспособность предложенной тепловой защиты проверена на ПЭВМ с использованием методов математического моделирования для асинхронного двигателя мощностью 5,5 кВт и напряжением статора 0,4 кВ.

Ключевые слова: *тепловая защита, асинхронные машины, короткозамкнутый ротор, эквивалентная температура нагрева, входное активное сопротивление, прямая последовательность.*

The work is devoted to the improvement of thermal protection of low-voltage asynchronous machines with caged rotor, based on the control of the equivalent heating temperature according to the definition of input active resistance of positive phase sequence in the cold and hot conditions. The calculations of the input resistances are based on measurement of phase currents and voltages, as well as the magnitude of the slip. The efficiency of the proposed thermal protection is verified on a PC using mathematical simulation methods for an induction motor with a power of 5.5 kW and a stator voltage of 0.4 kV.

Keywords: *thermal protection, asynchronous machines, caged rotor, equivalent heating temperature, input active resistance, positive phase sequence.*

Постановка задачи. Низковольтные асинхронные машины (АМ) с короткозамкнутым ротором (КЗР) являются ключевым видом электроприводных машин переменного тока, применяемых в настоящее время в промышленности, в ветроэнергетических установках, а также в системе собственных нужд электростанций.

Данный тип электрических машин характеризуется простотой конструкции и относительно лёгким обслуживанием. Однако, несмотря на вышеуказанные достоинства, процент повреждаемости АМ с КЗР составляет согласно [1-6] порядка 25-30% в год. Одной из причин высокой повреждаемости является некорректная и нечувствительная работа устройств релейной защиты и автоматики (РЗА). Поэтому задача дальнейшего совершенствования релейной защиты и автоматики современных низковольтных асинхронных машин является актуальной.

Анализ публикаций. Вопросам совершенствования РЗА асинхронных машин, в том числе и асинхронных электродвигателей (АЭД) с КЗР посвящено большое количество научных работ [1-6], в которых основное внимание уделено тепловым защитам (ТЗ). В [1-3] показаны модернизированные защиты от тепловой перегрузки, особенностью которых является использование псевдотепловых моделей, недостатками которых является неудовлетворительная работа в ряде аномальных и аварийных режимах работы, таких как смешанный режим, обрыв стержней КЗР и др. В [4-6] представлены наиболее перспективные алгоритмы ТЗ, основанные на контроле параметров текущего режима, однако требующие дальнейшей модернизации для применения в качестве защиты низковольтных АМ с КЗР.

Результаты исследований. В качестве платформы для совершенствования ТЗ низковольтных АМ с КЗР будем использовать алгоритм контроля эквивалентной температуры нагрева асинхронной машины на основе измерения параметров текущего режима, изложенный в [5]. В отличие от алгоритма ТЗ, представленного в [5] будем использовать для определения эквивалентной температуры нагрева асинхронной машины на основе измерения мгновенных значений фазных токов и напряжений, а также величины скольжения. С целью более корректной работы в несимметричных режимах будем использовать расчёт на каждом шаге работы микроконтроллера входных активных сопротивлений прямой последовательности (ПП), аналогично алгоритму, представленному в [6].

В данной работе в основе алгоритма ТЗ будем применять одноконтурную эквивалентную схему замещения (ЭСЗ) АМ с контуром потерь в стали статора и учётом скин-эффекта прямой последовательности, показанную на рис.1. Все вычисления будем выполнять в системе относительных единиц (о.е.).

Параметры избранной ЭСЗ АМ с КЗР ($R_S, X_{\sigma S}, X_{\mu}, R_{FE}, X_{\sigma FE}, R_R^{S=1}, X_{\sigma R}^{S=1}, R_R^{SHOM}, X_{\sigma R}^{SHOM}$) будем определять с использованием метода,

изложенного в [7]. Скин-эффект в данной схеме замещения учитывается упрощённо с помощью линейных зависимостей (1), что приемлемо для низковольтных машин.

$$R_R(s) = R_R^{s_{HOM}} + (R_R^{s=1} - R_R^{s_{HOM}}) \cdot (s - s_{HOM}) \cdot \frac{1}{s}, \quad (1)$$

$$X_{\sigma R}(s) = X_{\sigma R}^{s=1} + (X_{\sigma R}^{s_{HOM}} - X_{\sigma R}^{s=1}) \cdot (1 - s),$$

где $R_R^{s=1}$ и $X_{\sigma R}^{s=1}$ – активное и индуктивное сопротивления при скольжении равном $s = 1$; $R_R^{s_{HOM}}$ и $X_{\sigma R}^{s_{HOM}}$ – активное и индуктивное сопротивления при номинальном скольжении s_{HOM} ;

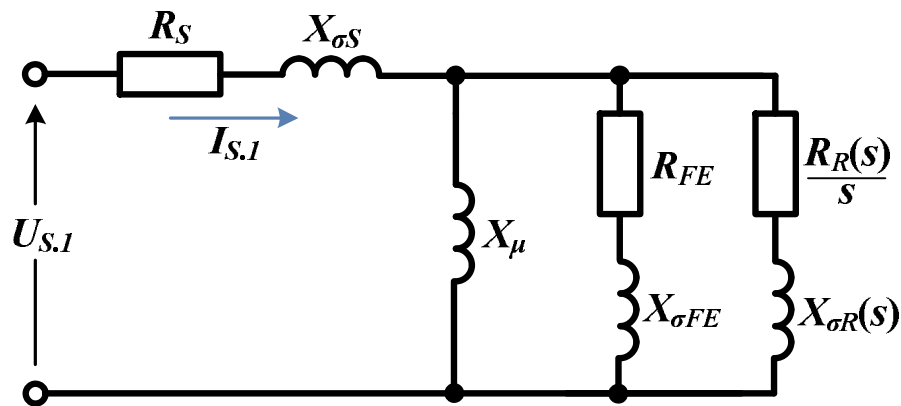


Рис. 1 – Одноконтурная эквивалентная схема замещения асинхронной машины прямой последовательности с контуром потерь в стали статора и учётом скин-эффекта

Идеей ТЗ, как и в [5] является определение в масштабе реального времени эквивалентной температуры нагрева асинхронной машины путём сравнения текущего расчётного значения входного активного сопротивления в горячем состоянии с известным значением холодного состояния.

На каждом шаге работы микропроцессорного терминала РЗиА для определения эквивалентной температуры нагрева АМ с КЗР должны производиться следующие вычислительные операции:

- Измерение мгновенных значений токов (i_a, i_b, i_c) и напряжений (u_a, u_b, u_c) фаз a, b и c ;
- При наличии датчика температуры, встроенного в обмотку статора, корректируем текущее значение активных сопротивлений статора и контура потерь в стали магнитопровода статора, аналогично [6];

- Измерение величины скольжения (s) одним из известных способов, например, датчиком угла положения ротора, установленным на валу АМ [3-6];
- Вычисление модулей обобщённого вектора тока и напряжения статора ПП асинхронного машины:

$$I_{s.l} = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{(i_{\alpha} - i_{\beta.n})^2 + (i_{\alpha.n} + i_{\beta})^2}, \quad U_{s.l} = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{(u_{\alpha} - u_{\beta.n})^2 + (u_{\alpha.n} + u_{\beta})^2}, \quad (2)$$

где $i_{\alpha} = i_a$, $i_{\beta} = \frac{i_b - i_c}{\sqrt{3}}$, $u_{\alpha} = u_a$, $u_{\beta} = \frac{u_b - u_c}{\sqrt{3}}$, – активные составляющие токов и напряжений статора машины в осях α , β ; $i_{\alpha.n}$, $i_{\beta.n}$, $u_{\alpha.n}$, $u_{\beta.n}$ – реактивные составляющие токов и напряжений статора АМ в осях α , β , вычисляемые по данным регистрации исходных параметров для моментов времени, которые сдвинуты по отношению к исходным на четверть периода частоты 50 Гц.

- Расчёт мощности ПП АМ с КЗР:

$$P_l = \frac{(u_{\alpha} - u_{\beta.n}) \cdot (i_{\alpha} - i_{\beta.n})}{4} + \frac{(u_{\alpha.n} + u_{\beta}) \cdot (i_{\alpha.n} + i_{\beta})}{4}; \quad (3)$$

- Определение входного активного сопротивления прямой последовательности в горячем состоянии:

$$R_{BX.l}^{zop}(s) = \frac{P_l}{I_{s.l}^2}, \quad (4)$$

- Определение входного активного сопротивления ПП машины в холодном (исходном) $R_{BX.l}^{ucx}(s)$ состоянии для текущей величины скольжения s :

$$R_{BX.l}^{ucx}(s) = R_s + \frac{A_R}{A_R + B_R}, \quad (5)$$

$$\text{где } A_R = \left[\frac{R_R(s) \cdot s^{-1}}{R_R(s)^2 \cdot s^{-2} + X_{\sigma R}(s)^2} + \frac{R_{FE}}{R_{FE}^2 + X_{\sigma FE}^2} \right]^2,$$

$$B_R = \left[\frac{R_R(s) \cdot s^{-1}}{R_R(s)^2 \cdot s^{-2} + X_{\sigma R}(s)^2} + \frac{R_{FE}}{R_{FE}^2 + X_{\sigma FE}^2} + \frac{1}{X_{\mu}} \right]^2.$$

- Определение текущего значения эквивалентной температуры нагрева АЭД с КЗР на основе сравнения входного активного сопротивления ПП, измеренного в горячем состоянии ($R_{BX.I}^{zop}(s)$) и известного сопротивления в холодном (исходном) состоянии ($R_{BX.I}^{ucx}(s)$) для текущей величины скольжения:

$$V_{AЭД.I} = \frac{R_{BX.I}^{zop}(s) - R_{BX.I}^{ucx}(s)}{R_{BX.I}^{ucx}(s)} \cdot (235 + V_{AЭД}^{нач}) + V_{AЭД}^{нач}, \quad (6)$$

где $V_{AЭД}^{нач}$ – эквивалентная температура асинхронного двигателя, измеряемая в начальном или холодном состоянии, $^{\circ}\text{C}$.

Работоспособность предложенной тепловой защиты асинхронной машины была проверена на современной ПЭВМ с использованием методов математического моделирования для АЭД с КЗР типа АИР-112-М4, каталожные данные которого представлены в табл.1. В работе применялась математическая модель АЭД с КЗР на основе полных дифференциальных уравнений, приведенная в [5]. Параметры ЭСЗ АМ для температуры 75°C были определены на основе каталожных данных, согласно [7], и представлены в табл.2.

Таблица 1 – Каталожные данные АЭД с КЗР типа АИР-112-М4

$P_{НОМ}$, кВт	$U_{НОМ}$, кВ	$I_{НОМ}$, А	$\cos\varphi_{НОМ}$	$\eta_{НОМ}$	$M_{П}/M_{НОМ}$	$M_{МАКС}/M_{НОМ}$	$I_{П}/I_{НОМ}$	$S_{НОМ}$
5,5	0,38	11,43	0,86	0,855	2	2,2	7	0,047

Таблица 2 – Параметры схемы замещения АЭД с КЗР типа АИР-112-М4 в о.е.

R_S	$X_{\sigma S}$	X_{μ}	R_{FE}	$X_{\sigma FE}$	$R_R^{S=1}$	$X_{\sigma R}^{S=1}$	$R_R^{S_{НОМ}}$	$X_{\sigma R}^{S_{НОМ}}$
0,082	0,08	2,254	0,782	13,91	0,026	0,019	0,03	0,227

**ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ,
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ И ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ СИСТЕМ**

Результаты расчётов режима увеличения нагрузки на валу (наброса нагрузки), подтверждающие правильность алгоритма приведены на Рис.2 в виде зависимости от времени эквивалентной температуры нагрева АЭД с КЗР, определённой по предложенному в работе алгоритму (V_R) и температурой, рассчитанной по определённому закону (V_R^*) как и в [5]. Совпадение практически $V_{АЭД}$ и $V_{АЭД}^*$ подтверждает правильность работы ТЗ АМ с КЗР. Также, аналогично [6], проверена корректная работа ТЗ при различных коэффициентах несимметрии, что подтверждает нивелирование влияния несимметричных режимов работы на точность определения температуры машины.

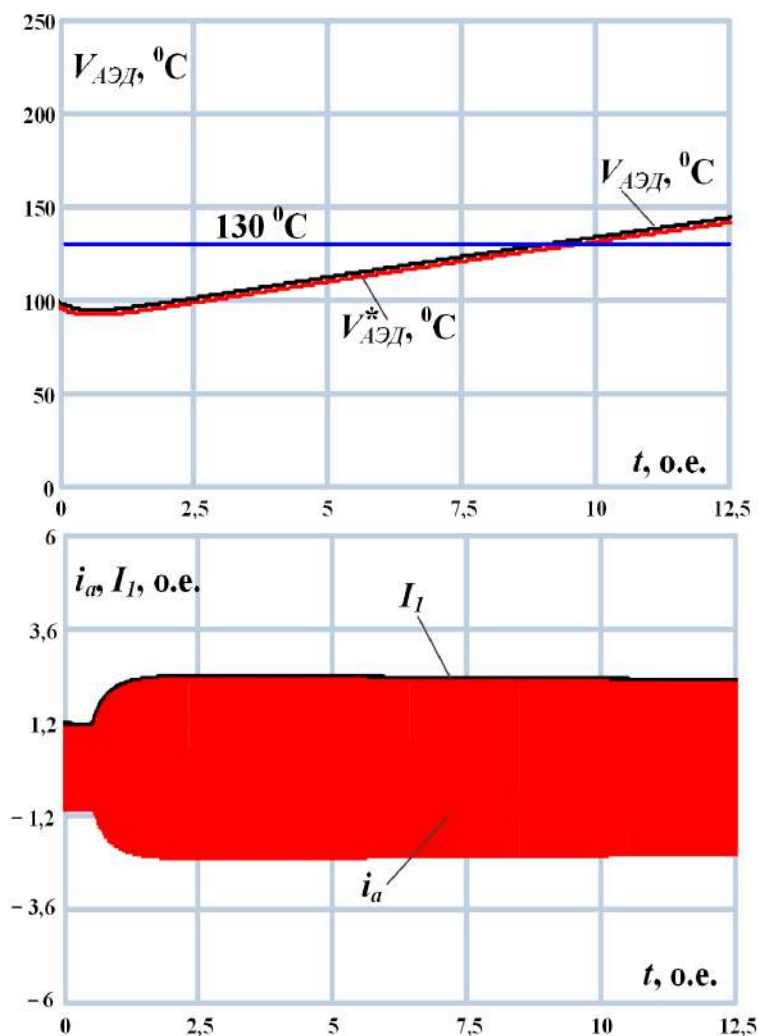


Рис.2 – Зависимость эквивалентной температуры нагрева АЭД с КЗР типа АИР-112-М4 от времени

Выводы

1. Предложен усовершенствованный алгоритм тепловой защиты низковольтных асинхронных машин с короткозамкнутым ротором на основе контроля параметров текущего режима.
2. Предложено косвенно определять эквивалентную температуру нагрева машины на основе определения по данным измерений параметров текущего режима входных сопротивлений прямой последовательности, что позитивно сказывается на работе тепловой защиты в различных несимметричных режимах.
3. Работоспособность предложенной тепловой защиты проверена на ПЭВМ с использованием методов математического моделирования для асинхронного двигателя мощностью 5,5 кВт и напряжением статора 0,4 кВ.

Перечень ссылок

1. Корогодский В.И. Релейная защита электродвигателей напряжением выше 1 кВ / С.Л. Кужеков, Л.Б. Паперно – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 248 с.
2. Гусаров А.А. Определение температуры элементов тепловой схемы замещения асинхронного двигателя для разработки теплового реле и диагностики / А.А. Гусаров, Е.Б. Ковалёв // Сборник научных трудов УкрВНИИВЭ. Серия «Взрывозащищённое оборудование». –2009. – С. 155 – 161.
3. Zocholl S.E. On the protection of thermal processes power delivery / S.E. Zocholl, G. Benmouyal // IEEE Transactions on Vol.20, Issue 2 – 2005. – P.: 1240 – 1246;
4. Ткаченко С.Н. Цифровая релейная защита низковольтных асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором системы собственных нужд электростанций / Збірник наукових праць ДВНЗ «Донецький національний технічний університет». Серія «Електротехніка і енергетика». – випуск 2 (15). – Донецьк, 2013. – С. 217 – 222.
5. Ткаченко С.Н. Прогнозирование срока службы асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором на основе контроля параметров текущего режима / С.Н. Ткаченко – Завалишинские чтения'16, ГУАП, г. СПб, №4. – 2016. – С.246-249.
6. 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.
7. Ткаченко С.Н. Метод идентификации параметров эквивалентных схем замещения асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором / Ткаченко С.Н. // Збірник наукових праць ДВНЗ «Донецький національний технічний університет». Серія «Електротехніка і енергетика». – випуск 1 (16). – Донецьк, 2014. – С. 210 – 215.