

МОДЕЛИРОВАНИЕ АЛГОРИТМА ТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ КОРОТКОЗАМКНУТОГО РОТОРА АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

© Сивокобыленко В.Ф., Ткаченко С.Н., 2009

Розглянуто математичне моделювання теплового захисту короткозамкненого ротора асинхронного електродвигуна. Алгоритм визначення температури нагрівання обмотки ротора працюючого двигуна заснований на обчисленні в темпі реального часу активного опору ротора і його порівнянні з відомим значенням для холодного стану.

This article describes mathematical simulation of squirrel-caged rotor winding overheat protection of induction motor. The measuring algorithm is based on real-time active rotor resistance of working motor calculation with afterwards comparison of calculated value to the known rotor resistance value in cold condition.

Постановка проблеми. Общеизвестно, что основным типом машин переменного тока, применяемых в качестве электропривода механизмов собственных нужд электрических станций, а также механизмов промышленных предприятий, являются асинхронные электродвигатели (АЭД) с короткозамкнутым ротором (КЗР). Из-за частых пусков и остановов АЭД процент их повреждаемости составляет 20–25 % в год от общего числа эксплуатируемых двигателей, причём в половине случаев аварийных ситуаций объём повреждений может быть существенно снижен при наличии быстродействующих и чувствительных устройств релейной защиты и автоматики.

Чувствительность применяемых устройств релейной защиты асинхронных машин, в том числе и микропроцессорных, особенно неудовлетворительна в аномальных и аварийных режимах, сопровождающихся существенным перегревом обмоток электродвигателя, таких как несимметрия питающего напряжения, неисправности в системе охлаждения, обрыв стержней обмотки КЗР, обрыв фазы обмотки статора, многократные пуски подряд, заклинивание вала и т. д. Исходя из этого, актуальной является разработка более совершенных защит, ориентированных на применение в микропроцессорных системах.

Анализ предыдущих исследований и публикаций. Критически анализируя современное состояние микропроцессорных устройств релейной защиты и автоматики электродвигателей, следует отметить, что в большей части производимых терминалов применяется с незначительными доработками стандартная защитная логика (токовая отсечка, защита от перегрузки, защита от замыканий в обмотке статора и т.д.), рекомендуемая ПУЭ [1]. Как ранее упоминалось, такие защиты неудовлетворительно работают в ряде аварийных и аномальных режимах, что, безусловно, отражается на технологическом процессе, в котором участвует двигатель.

Для выявления и устранения режима перегрузки АЭД с КЗР в настоящее время применяются следующие защиты:

- использующая интегральную зависимость тока статора в функции времени [1, 2];
- базирующаяся на псевдотепловой модели, использующей измерение тока статора [3];
- базирующаяся на псевдотепловой модели с использованием тепловых схем замещения и сигналов от тепловых датчиков или термодатчиков (ТД), встраиваемых в пазах и в лобовых частях обмотки статора АЭД [4];

- позволяющая определять температуру нагрева обмоток статора и ротора из решения уравнения теплового баланса по данным вычисления электромагнитного момента на основе измерения фазных токов и напряжений статора АЭД [5];
- косвенно определяющая температуру нагрева обмоток статора и ротора по данным измерения активного сопротивления ротора на основе измерений параметров текущего режима (мгновенные значения фазных токов, фазных напряжений и скольжения) [6, 7].

Подходы [1–3] не позволяют контролировать температуру нагрева ротора и не способны отключать АЭД в таких аномальных режимах сопровождающихся интенсивным перегревом, как например, многократные пуски подряд и работа при несимметрии питающего напряжения.

Контролировать температуру ротора с использованием ТД является довольно сложной и дорогостоящей задачей. В данном случае трудности связаны, прежде всего, с установкой ТД в пазы обмотки КЗР, а также с обеспечением надёжного и качественного съёма сигнала. Поэтому наибольшее распространение получили алгоритмы косвенного определения температуры нагрева обмотки ротора АЭД [4–7].

Алгоритм [4] не эффективен при неисправностях в системе охлаждения машины (засорение вентиляционных каналов, поломка крыльчатки охлаждающего вентилятора). Причём дополнение защиты контролем сигналов от ТД обмотки статора, как правило, не устраняют существующие недостатки в виду их инерционности.

Защиты [5, 6] построены на косвенном определении температуры нагрева обмоток по данным замеров параметров текущего режима. В [5], как уже упоминалось, температуру вычисляют из решения уравнения теплового баланса по данным определения электромагнитного момента на основе измерения фазных токов и напряжений статора. Скольжение в данном алгоритме определяется косвенно, что вносит значительную погрешность в расчёты. В [6] усреднённое значение температуры обмотки КЗР находят по данным определения активного сопротивления на основе замеров фазных токов, напряжений и величины скольжения. Оба подхода не пригодны для АЭД мощностью свыше 200 кВт, в которых проявляется эффект вытеснения в роторе.

Наиболее перспективной защитой от тепловой перегрузки АЭД с КЗР является алгоритм [7] построенный, как и [6], на косвенном определении температуры нагрева обмоток статора и ротора по данным замеров параметров текущего режима (мгновенные значения фазных токов, фазных напряжений и скольжения), но учитывающий эффект вытеснения тока в роторе. Однако этот алгоритм требует дальнейшего совершенствования в направлении учёта параметров эквивалентной схемы замещения (ЭСЗ) АЭД с вытеснением тока в роторе для использования в микропроцессорных терминалах. Качественные исследования поведения защиты в различных режимах наиболее целесообразно проводить с применением математических моделей.

Задача исследований. В данной работе задачей исследований является математическое моделирование и совершенствование алгоритма тепловой защиты короткозамкнутого ротора асинхронного электродвигателя с вытеснением тока в роторе.

Изложение основного материала. Идея алгоритма косвенного измерения температуры ротора состоит в расчёте в реальном времени активного сопротивления ротора в горячем состоянии по данным замеров параметров текущего режима (мгновенные значения фазных токов, фазные напряжения и величина скольжения) и по результатам сравнения активных сопротивлений ротора в известном холодном и текущем горячем состояниях определяют температуру нагрева обмотки короткозамкнутого ротора.

Реализация такого алгоритма требует знания параметров ЭСЗ электродвигателя. При этом как, уже упоминалось, для АЭД мощностью выше 200 кВт параметры зависят от вытеснения тока, что требует учёта функциональных зависимостей активного ($R_r(s)$) и индуктивного ($X_{\sigma r}(s)$) сопротивлений ротора от скольжения (рис. 1). Потери в стали статора будем учитывать путём введения в ЭСЗ дополнительного контура потерь в стали ($R_{FE}, X_{\sigma FE}$).

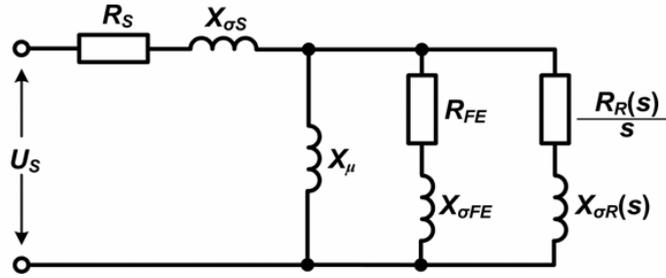


Рис. 1. Эквивалентная схема замещения АЭД с контуром потерь в стали статора и одним контуром на роторе

Для учёта явления скин-эффекта воспользуемся, изложенными в [8], линейными зависимостями. Тогда с учётом температуры нагрева активного сопротивления имеем

$$\begin{aligned} R_R(s, V) &= R_R^{s_{HOM}} \cdot K_V + (R_R^{s=1} \cdot K_V - R_R^{s_{HOM}} \cdot K_V \cdot (s - s_{HOM})) \cdot s^{-1}, \\ X_{\sigma R}(s) &= X_{\sigma R}^{s=1} + (X_{\sigma R}^{s_{HOM}} - X_{\sigma R}^{s=1}) \cdot (1 - s), \end{aligned} \quad (1)$$

где $R_R^{s=1}$ и $X_{\sigma R}^{s=1}$ – соответственно активное и индуктивное сопротивления при скольжении $s = 1$; $R_R^{s_{HOM}}$ и $X_{\sigma R}^{s_{HOM}}$ – соответственно активное и индуктивное сопротивления при номинальном скольжении s_{HOM} ; K_V – коэффициент коррекции активных сопротивлений от текущего значения температуры, определяемый по (2).

$$K_V = (1 + \alpha \cdot V_R) / (1 + \alpha \cdot V_R^{i\dot{\alpha}^+}), \quad (2)$$

где α – температурный коэффициент проводника обмотки, $1/^\circ\text{C}$; V_R – конечное значение температуры нагрева обмотки ротора; $V_R^{i\dot{\alpha}^+} = V_R^{i\dot{\alpha}^+}$ – температура холодного (начального) состояния обмоток машины, $^\circ\text{C}$.

Определение параметров ЭСЗ АЭД (R_S , $X_{\sigma S}$, X_μ , R_{FE} , $X_{\sigma FE}$, R_R , $X_{\sigma R}$) при известной температуре начального состояния в данном случае производим по методу идентификации параметров ЭСЗ АЭД, изложенному в [9] или из опытов холостого хода, короткого замыкания и работы под нагрузкой. Последовательность вычислительных операций алгоритма тепловой защиты обмоток электродвигателя, производимых (в системе относительных единиц (о.е.)) микропроцессорным устройством на каждом дискретном шаге реального времени показана на рис. 2.

Для проверки оценки работоспособности алгоритма тепловой защиты КЗР используем математическую модель электродвигателя, представляющую собой систему дифференциальных уравнений (ДУ), записанную в неподвижной относительно статора системе координат α, β (рис. 1).

$$\begin{cases} p\Psi_{S,\alpha} = U_{S,\alpha} - R_S \cdot i_{S,\alpha}, & p\Psi_{S,\beta} = U_{S,\beta} - R_S \cdot i_{S,\beta}, \\ p\Psi_{R,\alpha} = -R_R(s, V) \cdot i_{R,\alpha} + \omega \cdot \Psi_{R,\beta}, & p\Psi_{R,\beta} = -R_R(s, V) \cdot i_{R,\beta} - \omega \cdot \Psi_{R,\alpha}, \\ p\Psi_{FE,\alpha} = -R_{FE} \cdot i_{FE,\alpha}, & p\Psi_{FE,\beta} = -R_{FE} \cdot i_{FE,\beta}, \\ p\omega = J^{-1} \cdot (M - M_c(\omega, k_3)), \end{cases} \quad (4)$$

где

$$\Psi_{\mu,\alpha} = a_S \cdot \Psi_{S,\alpha} + a_R \cdot \Psi_{R,\alpha} + a_{FE} \cdot \Psi_{FE,\alpha}, \quad \Psi_{\mu,\beta} = a_S \cdot \Psi_{S,\beta} + a_{R1} \cdot \Psi_{R,\beta} + a_{FE} \cdot \Psi_{FE,\beta},$$

$$M = (\Psi_{S,\beta} \cdot \Psi_{\mu,\alpha} - \Psi_{S,\alpha} \cdot \Psi_{\mu,\beta}) / X_{\sigma S}, \quad a_S = \frac{X_{SR}}{X_{\sigma S}}, \quad a_R = \frac{X_{SR}}{X_{\sigma R}(s)}, \quad a_{FE} = \frac{X_{SR}}{X_{\sigma FE}},$$

$$X_{SR} = [X_\mu^{-1} + X_{\sigma S}^{-1} + (X_{\sigma R}(s))^{-1} + X_{\sigma FE}^{-1}]^{-1}.$$

где $\Psi_{S,\alpha}, \Psi_{R,\alpha}, \Psi_{FE,\alpha}, \Psi_{S,\beta}, \Psi_{R,\beta}, \Psi_{FE,\beta}$ – мгновенные значения потокосцеплений по осям α и β статора, контура ротора и контура потерь стали; $\Psi_{\mu,\alpha}, \Psi_{\mu,\beta}$ – мгновенные значения рабочего потокосцепления (потокосцепление воздушного зазора) по осям α и β ; a_S, a_R, a_{FE} – коэффициенты распределения потокосцеплений статора, контура ротора и контура потерь в стали; X_{SR} – суммарная

входная проводимость двигателя; ω – мгновенное значение угловой частоты вращения ротора АЭД; M – текущее расчетное значение электромагнитного момента на валу; M_c, J, k_3 – момент сопротивления, суммарный момент инерции привода и коэффициент загрузки механизма; $U_{S,\alpha}, U_{S,\beta}$ – мгновенные значения напряжения статора по осям α и β .

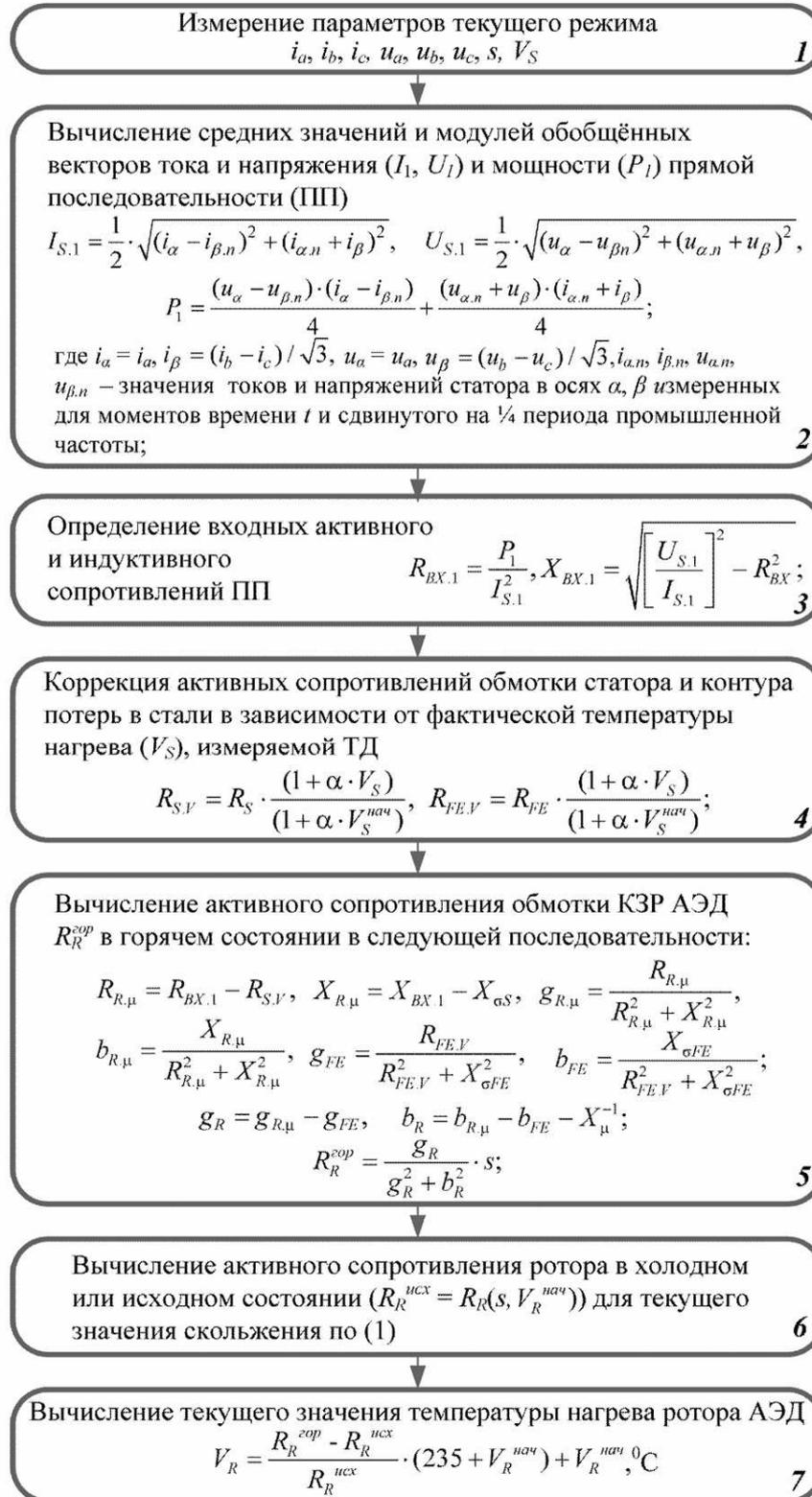


Рис. 2. Блок-схема алгоритма определения температуры нагрева обмотки КЗР АЭД

Из решения системы ДУ (4) одним из численных методов определяются токи статора, контура ротора, контура потерь в стали и ветви намагничивания определяем для каждой как

$$i_{S,\alpha} = \frac{\Psi_{S,\alpha} - \Psi_{\mu,\alpha}}{X_{\sigma S}}, i_{R,\alpha} = \frac{\Psi_{R,\alpha} - \Psi_{\mu,\alpha}}{X_{\sigma R}(s)}, i_{FE,\alpha} = \frac{\Psi_{FE,\alpha} - \Psi_{\mu,\alpha}}{X_{\sigma FE}}, i_{\mu,\alpha} = i_{S,\alpha} + i_{R,\alpha} + i_{FE,\alpha}, \quad (5)$$

$$i_{S,\beta} = \frac{\Psi_{S,\beta} - \Psi_{\mu,\beta}}{X_{\sigma S}}, i_{R1,\beta} = \frac{\Psi_{R,\beta} - \Psi_{\mu,\beta}}{X_{\sigma R}(s)}, i_{FE,\beta} = \frac{\Psi_{FE,\beta} - \Psi_{\mu,\beta}}{X_{\sigma FE}}, i_{\mu,\beta} = i_{S,\beta} + i_{R,\beta} + i_{FE,\beta}. \quad (6)$$

Работоспособность защиты проверена путём задания произвольного закона измерения температуры обмоток статора и ротора и определения, по изложенному в работе, алгоритму расчетных значений температуры. В данной работе принимался линейный закон изменения температуры во времени (начальное значение: $V_R = 155$ °C; конечное: $V_R^{i\dot{a}^+} = 183$ °C).

Моделирование и эксперименты производились для АЭД типа АИР-112-М4 ($P_{НОМ} = 5,5$ кВт; $U_{НОМ} = 0,38$ кВ; $I_{НОМ} = 11,43$ А; $\cos\varphi_{НОМ} = 0,86$; $\eta_{НОМ} = 0,855$; $M_{П}/M_{НОМ} = 2$; $M_{МАКС}/M_{НОМ} = 2,2$; $I_{П}/I_{НОМ} = 7$; $s_{НОМ} = 0,047$). Рассчитанные параметры схемы замещения для номинального скольжения и температуры 75 °C приведены в таблице.

Параметры схемы замещения АЭД типа АИР-112-М4 в о.е.

R_S	$X_{\sigma S}$	$X_{\mu N}$	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	13,913	0,026	0,019	0,03	0,227

Результаты расчётов, подтверждающие правильность алгоритма приведены на Рис.3 в виде зависимости температуры нагрева ротора, определённой по модели (V_R) и по заданному закону (V_R^*), от времени.

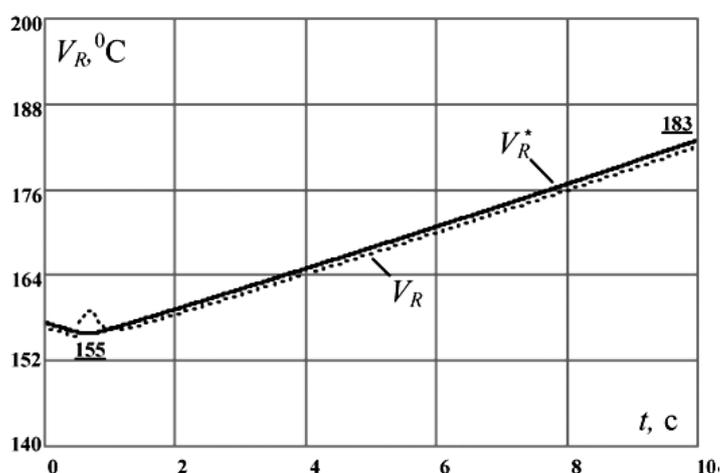


Рис. 3. Зависимость температуры нагрева обмотки ротора АЭД от времени

Расчёт входных сопротивлений по составляющим ПП позволяет устранить влияние несимметрии питающего напряжения на точность определения температуры ротора, что также подтверждено результатами моделирования для коэффициентов несимметрии 2, 4 и 8 %.

Для проверки работоспособности защиты в реальных условиях применялась экспериментальная установка, состоящая из испытуемого асинхронного электродвигателя типа АИР-112-М4 и сочленённого с ним генератора постоянного тока (ГПТ) мощностью 4,6 кВт (для создания момента сопротивления или нагрузки на валу).

Группа необходимых для тепловой защиты входных сигналов (мгновенные значения фазных токов и напряжений, угол положения ротора) поступают на блок гальванической развязки, а после него на входы группы синхронных АЦП. Измерение скорости в данной экспериментальной схеме

осуществлялось с помощью оптического датчика приращений (энкодера) или датчика угла положения ротора типа ВЕ-178А, соединённого с валом установки через гибкую муфту.

Микропроцессорное устройство, в данном случае цифровой регистратор основан на базе ПЭВМ (процессор: Intel® Pentium® III с тактовой частотой 550 МГц, оперативная память: 256 МБ).

В качестве группы синхронных АЦП применена десятиканальная плата фирмы Fastwel® АIC12101 АI8S-5А-1 типоисполнения для шины данных ISA. Максимальная частота АЦП составляет 100 кГц (в эксперименте – 10 кГц). Для подсчёта импульсов, формируемых ДПП, применена плата фирмы Advantech® РСI-1780, работающая на шине РСI.

Оциллографирование осуществлялось под управлением программы, разработанной на кафедре “Электрические станции” ГВУЗ “ДонНТУ”. После проведения необходимых экспериментов программа формирует на жёстком диске ПЭВМ результирующий файл в текстовом формате. Управляющая цифровым регистратором программа работает под управлением операционной системы MS DOS. Результирующий текстовый файл пригоден для дальнейшего использования и анализа в любых специализированных приложениях, работающих под управлением любой операционной системы, например ОС Windows™, ОС Linux, ОС Solaris™ и др.

С помощью указанной аппаратуры регистрировались параметры текущего режима и на их основе проводились расчёты температуры нагрева КЗР, по изложенному в работе, алгоритму. Результаты расчётов по данным эксперимента показаны на рис.4 в виде зависимостей от времени тока фазы А и температуры нагрева ротора (среднее значение составляет $V_{R,cp} = 44^{\circ}\text{C}$).

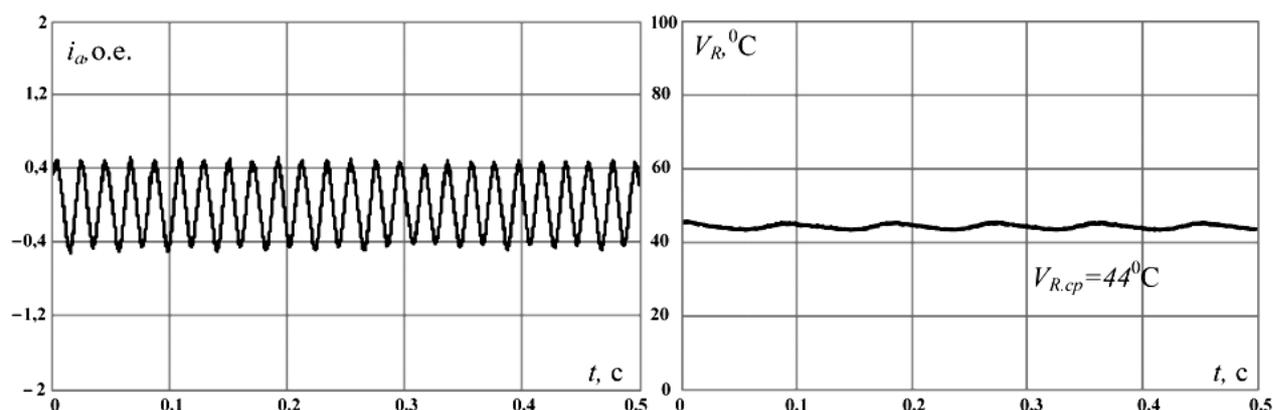


Рис. 4. Экспериментальные зависимости тока фазы А статора и температуры нагрева обмотки ротора АЭД

Из результатов математического моделирования и расчётов по данным эксперимента, приведенных в работе, можно судить о корректном функционировании алгоритма и рекомендовать его для применения в современных цифровых устройствах релейной защиты АЭД.

Выводы. Предложен усовершенствованный алгоритм тепловой защиты асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором, основанный на косвенном расчёте температуры нагрева ротора. Вычисление температуры нагрева производится в темпе реального времени путём расчёта активного сопротивления ротора и его сравнения с известным значением для холодного состояния на основе измерения величин фазных токов и напряжений, скольжения и температуры нагрева обмотки статора. Указанный алгоритм реализован в виде математической модели для ПЭВМ, состоящей из АЭД с КЗР и рассмотренной защиты. Сравнительный анализ данных полученных с использованием экспериментальной установки и с помощью модели подтверждают работоспособность разработанного алгоритма тепловой защиты КЗР АЭД.

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 электро-

снабжения [Учебник для вузов. 4-е изд. Перераб. и доп.] / В.А. Андреев. – М.: Высш. шк., 2006. – 639 с.

3. Сушко В. Защита низковольтных электродвигателей. Совершенных защит не существует [Электронный ресурс] / В. Сушко // Новости электротехники. – М., 2005. – № 4 (34). – Режим доступа к журн.: <http://www.news.elteh.ru/arh/2005/34/11.php>.

4. Счастливый Г.Г. Математические модели теплопередачи в электрических машинах / Г.Г. Счастливый, В.В. Бандурин, В.Н. Остапенко, С.Н. Остапенко. – К.: Наукова думка, 1986. – 182 с.

5. Пат. 69523 А, Україна, МПК7 H02P 5/04. Пристрій захисту асинхронного двигуна / Д.Й. Родькін, О.П. Чорний, В.Ф. Живота [та інші].; заявник і правовласник Кременчуцький державний політехнічний університет імені Михайла Остроградського. – № 2003042859, опубл. 5.09.2004. – Бюл. № 9, 2004 р.

6. Beguenane R. Induction motors thermal monitoring by means of rotor resistance identification / R. Beguenane, M.E.H. Benbouzid // IEEE Transaction on Energy Conversion. – 1999. – Vol. 14. – Issue 3. – P. 566–570.

7. Сивокобыленко В.Ф. Способы реализации тепловой защиты асинхронных электродвигателей, основанной на измерении входных сопротивлений / В.Ф. Сивокобыленко, С.Н. Ткаченко // Зб. наук. праць ДВНЗ “Донецький національний технічний університет”. Сер. Електротехніка і енергетика. – Донецьк, 2008. – Вип. 8 (140). – С. 13 – 18.

8. Ойрех Я.А. Режимы самозапуска асинхронных двигателей / Я.А. Ойрех, В.Ф. Сивокобыленко – М.: Энергия, 1974. – 96 с.

9. Сивокобыленко В.Ф. Математическое моделирование характеристик асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором с учётом потерь в стали / В.Ф. Сивокобыленко, С.Н. Ткаченко // Зб. наук. праць ДВНЗ “Донецький національний технічний університет”. Сер. Електротехніка і енергетика. – Донецьк, 2007. – Вип. 7 (128). – С. 126–131.

УДК 621.313.32

В.Ф. Сивокобыленко, П.А. Харченко
ГВУЗ “Донецкий национальный технический университет”

ДИНАМИЧЕСКОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

© Сивокобыленко В.Ф., Харченко П.А., 2009

Запропоновано алгоритм перетворення розрахункових схем великих електричних мереж, за допомогою якого може бути істотно підвищена ефективність моделювання у темпі реального часу. Алгоритм побудований на основі заміни віддалених ділянок електричного кола на еквівалентні багатострумеві зірки, що складаються з функціональних джерел струму. Функції джерел отримуються за допомогою чисельно-аналітичного розв’язання системи повних диференціальних рівнянь схеми.

The article introduces the transforming algorithm for computational schemes of large power grids, which can significantly enhance performance of transient modeling in real-time. The algorithm is based on replacing remote areas of electrical circuit with equivalent multi-ray stars, which consists of functional current sources. The functions of current sources obtain through numeric-analytical solution of the scheme’s full differential equations system.

Постановка проблеми. Одним из наиболее перспективных подходов к построению алгоритмов действия микропроцессорных терминалов в современных электрических системах является моделирование переходных процессов в темпе реального времени. Синхронное моделирование, выполняемое с непрерывной обработкой сигналов от контрольно-измерительных