

УДК 621.313.333:622

А.А. Гусаров, Е.Б. Ковалёв, А.А. Гусаров
Донецкий национальный технический университет, г. Донецк
кафедра «Электромеханики и ТОЭ»
Email: alan@online.dn.ua

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАЩИТА НИЗКОВОЛЬТНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ В СОСТАВЕ УСТРОЙСТВ ПЛАВНОГО ПУСКА

Аннотация

Гусаров А.А., Ковалёв Е.Б., Гусаров А.А. Температурная защита низковольтного асинхронного двигателя в составе устройств плавного пуска. Приведены результаты воплощения модели температурного состояния статорной и роторной обмоток низковольтного асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором 2ЭДКОФ 250 М4 в нестационарных режимах работы с учетом эффекта вытеснения тока. Собранные на базе микроконтроллера ATmega16 комбинированное температурное реле проверено на соответствие требованиям действующих ГОСТов и предлагается к использованию в составе устройств плавного пуска низковольтных асинхронных двигателей.

Ключевые слова: Быстронарастающая тепловая перегрузка, комбинированная защита, термодетектор, нагрев обмотки ротора, асинхронный двигатель, нестационарный режим.

Общая постановка проблемы.

С момента изобретения, трехфазный асинхронный электродвигатель с ротором типа «беличье колесо»¹ (АД) стал самым распространенным приводом промышленного оборудования. Простота конструкции, надежность, низкая стоимость и высокий коэффициент полезного действия позволяют предположить, что данный тип двигателя останется в обозримом будущем главным источником механической энергии.

Основные недостатки привода с АД сводятся к несогласованности крутящего момента двигателя и момента нагрузки, как во время пуска, так и во время работы. Нестационарные режимы работы, например: тяжёлые условия пуска, частые коммутации, случайные во времени изменения момента нагрузки, отклонения параметров качества электроснабжения от их номинальных значений и пр., опасны для приводного двигателя отклонениями в его температурном режиме. При эксплуатации мощных АД с КЗ-ротором в режиме S_4^2 ситуация может развиваться вплоть до температурных деформаций и расплавления алюминиевых стержней КЗ-ротора [1, 2]. Для управления режимами пуска и торможения низковольтных АД с КЗ-ротором с наиболее благоприятным для приводного механизма режимом (Рис.1) популярным становится применение регулируемого привода, чему способствовало появление широкого спектра тиристорных пусковых устройств (ТПУ), или, как их ещё называют, устройств плавного пуска³ [3].

¹ Германский патент № 51083 от 1889 года на имя г-на Доливо-Добровольского Михаила Осиповича.

² Режим S_4 (ГОСТ 183-74) – периодический повторно-кратковременный режим работы электродвигателя с влиянием пусковых процессов. Последовательность идентичных режимов работы, каждый из которых включает время пуска, время работы при постоянной нагрузке, за которое двигатель не нагревается до установившейся температуры, и время стоянки, за которое двигатель не охлаждается до температуры окружающей среды.

³ В настоящее время ТПУ выпускают такие мировые производители, как ABB, Siemens, Emotron AB, Softronic, Telemecanique, Ansaldo и ряд других. Выпуск ТПУ освоили и отечественные фирмы.

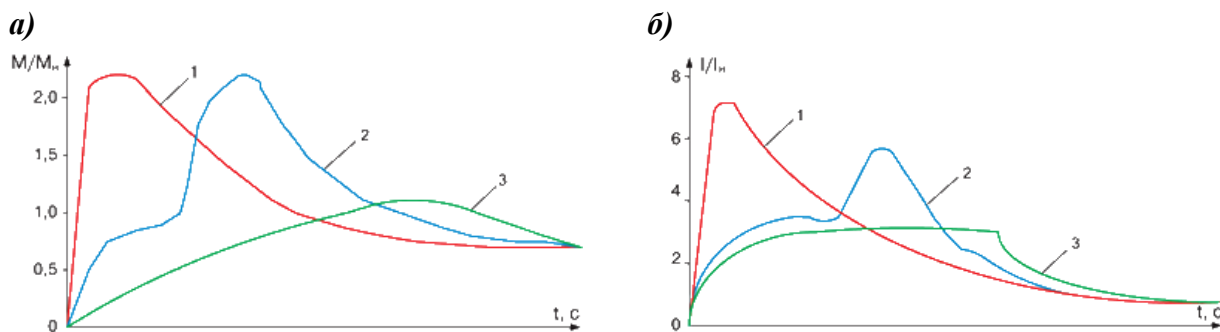


Рисунок 1 – Типичные кривые изменения пускового момента *a)* и пускового тока *б)*:

- 1 – прямой пуск;
- 2 – пуск переключением со звезды на треугольник;
- 3 – пуск при помощи тиристорного пускового устройства.

ТПУ представляют собой динамические контроллеры-оптимизаторы асинхронных электродвигателей, которые обеспечивают: плавный пуск АД в тяжелых пусковых режимах с ограничением пусковых токов до $1,5 \div 3 I_{ном}$; возможность точной настройки разгонной характеристики, позволяя запускать практически любое оборудование "номинал в номинал"; снижение активной и, особенно, реактивной мощностей.

Кроме функций управления, эти устройства обеспечивают защиту АД от аномальных режимов и диагностику, как при пуске, так и в рабочем режиме. К стандартным функциям относятся:

- защита от несимметрии питающего напряжения;
- защита от недопустимого снижения / повышения питающего напряжения;
- защита от обрыва фаз на входе ТПУ;
- защита от обратного чередования фаз на входе ТПУ;
- защита от короткого замыкания на выходе ТПУ;
- защита от заклинивания вала двигателя при пуске;
- защита от перегрузки по току в рабочем режиме;
- тепловая защита двигателя;
- защита от пробоя силового тиристора;
- защита при потере управляемости тиристора.

Цель статьи.

Тепловая защита ТПУ предполагает наличие в двигателе встроенного в лобовую часть статорной обмотки термодетектора, а в системе управления ТПУ предусматривается наличие соответствующего входа и системы обработки сигналов от термодетектора.

В случае, когда конструкция АД не предусматривает встроенного термодетектора, ТПУ позволяет выполнить, так называемую, косвенную тепловую защиту, которая основывается на той или иной тепловой модели двигателя, заложенной изготовителем в программное обеспечение микропроцессора. Целесообразно, чтобы тепловая модель двигателя давала возможность определять не только температуру статорной обмотки, но и температуру роторной обмотки. Например, в случае двигателя с глубоким пазом КЗ - ротора, информации о температуре статорных обмоток для его тепловой защиты не достаточно. В настоящее время изготовителем директивно ограничивается число повторных пусков таких двигателей. Например, для конвейерного двигателя типа 2ЭДКОФ250М4 предусмотрено не более двух пусков из практически холодного состояния и не более одного из горячего; последующий пуск – не ранее, чем через 3 часа. В случае нарушения этого ограничения, двигатель может выйти из

строю по причине выплавления клетки ротора⁴.

Авторами настоящей статьи предлагается к применению в составе ТПУ разработанное ими тепловое реле, собранное на базе однокристального микропроцессора ATmega16. Отличительной особенностью предлагаемого реле является возможность определять температуру в обмотке короткозамкнутого ротора с учётом эффекта вытеснения тока [4].

Разработанной защите, отвечает код TP221 - защита для двух типов тепловых перегрузок в двух уровнях (аварийная сигнализация и отключение) с первой категорией встроенной защиты.

Анализ публикаций. В настоящее время чаще используются системы температурной защиты, основанные на принципе контроля температуры защищаемых частей, создающие простые и эффективные средства защиты вращающихся машин от чрезмерного повышения температуры, включая случаи, когда рост температуры вызван неисправностями системы охлаждения или очень высокой температурой окружающей среды, в то время как системы защиты, основанные на принципе потребляемого тока, не могут обеспечить такой защиты.

Современные системы непрерывного контроля температуры двигателя можно разбить на три класса: системы косвенного определения температуры, системы непосредственного измерения и комбинированные системы.

Косвенные системы не позволяют учитывать влияния на температурный режим машины параметров окружающей среды, качества электроснабжения, состояния конструктивных элементов самой машины. С их помощью невозможно организовать защиту отдельного элемента двигателя. Системы непосредственного измерения температуры не в состоянии защитить двигатель от быстро нарастающих тепловых перегрузок и не позволяют оценить среднюю температуру защищаемого узла, что не соответствует требованиям ГОСТ 27888-88. Сделан вывод, что совместное использование двух систем позволит полностью скомпенсировать их индивидуальные недостатки. Такая комбинированная защита оптимальна, т.к. позволяет отслеживать режимы быстро и медленно нарастающих тепловых перегрузок с учётом изменений внешних условий.

Непосредственное измерение температуры удалось использовать для повышения качества математического моделирования теплового состояния двигателя: уточняются начальные условия, обнуляются «ошибки накопления», что позволяет избежать ложного срабатывания защиты и учитывать влияние на нагрев двигателя внешних факторов, реализуя функции текущего контроля.

Заложенный в микропроцессор предлагаемого реле алгоритм программного обеспечения, используя данные от термодетектора, позволяет судить об отклонениях в электроприводе, которые могут привести к разрушению двигателя. В условиях работы привода, удовлетворяющих техническим условиям на параметры окружающей среды и энергоснабжения, измеренная термодетектором температура должна быть близка к расчетной температуре. Это является критерием нормальной работы электропривода. Если же отличие в этих температурах будет выходить за рамки допустимой погрешности, это может быть поводом для генерации сигнала эксплуатирующему персоналу для определения причин неполадок. Публикаций о тепловых защитах КЗ-ротора учитывающих влияние эффекта вытеснения тока в его стержнях практически нет. В последние годы появились работы по этому вопросу, проводимые д.т.н. Сивокобыленко В.Ф и его учениками для высоковольтных АД. Учет вытеснения тока в пазу ротора производится здесь контролем сопротивления обмотки ротора в функции от скольжения, с учетом двухконтурной схемы замещения асинхронного двигателя [5].

Результаты исследований. У предлагаемого к использованию в составе ТПУ реле имеется два варианта работы:

⁴ Повреждения обмотки ротора имеют до 40% АД, поступающих в капитальный ремонт на заводы Донбасса. КЗ-ротор является неремонтопригодным. Двигатель с такой поломкой восстановлению не подлежит.

Вариант 1. Когда двигатель отключается термодетектором. Применяется в случае медленно нарастающих тепловых перегрузок. Порог срабатывания защиты - $\nabla_{\text{ГТМ}}=170^\circ\text{V}^5$.

Условие отключения двигателя: $\theta_{1\text{,лоб}} + \nabla_{\text{окр}} > \nabla_{\text{тд}}$.

Вариант 2. Двигатель отключается температурным реле. Применяется в случае быстро нарастающих тепловых перегрузок. Условие отключения двигателя: $\theta_1 + \nabla_{\text{окр}} > \nabla_{\text{реле}}$ или $\theta_2 + \nabla_{\text{окр}} > \nabla_{2\text{обм.доп.}}$. Здесь: $\theta_{1\text{,лоб}}$ – температура лобовой части обмотки статора; θ_1, θ_2 – температуры обмоток статора и ротора соответственно с учётом эффекта вытеснения тока; $\nabla_{\text{тд}}$ – температура срабатывания термодетектора; $\nabla_{\text{реле}}$ – температура срабатывания цифрового реле; $\nabla_{2\text{обм.доп.}}$ – допустимая температура обмотки ротора; $\nabla_{\text{окр}}$ – нормальная температура окружающей среды⁶.

Опытный образец температурного реле запрограммирован и настроен для защиты одного из наиболее распространенных двигателей – взрывозащищенного низковольтного асинхронного электродвигателя для привода скребкового конвейера 2ЭДКОФ250М4 мощностью 55 кВт ($\nabla_{\text{окр}}=30^\circ\text{C}$). Поскольку для расчета температур в реле вводятся параметры тепловой схемы замещения конкретного двигателя и контролируются значения потребляемых им токов, предлагаемое температурное реле является индивидуальным под определенный тип двигателя.

Оценка работы предлагаемой температурной защиты по ГОСТ 27888-88 сведена в Табл. 1. Для медленно нарастающей тепловой перегрузки выбран режим скачкообразной нагрузки двигателя с коэффициентом нагрузки $k_I=1.4$, для быстро нарастающей – режим стоянки под током короткого замыкания, $k_I=7.4$.

Таблица 1 - Результаты работы температурной защиты

Вариант защиты	Скорость нарастания тепловой перегрузки	$\theta_{\text{из.доп.}}, ^\circ\text{C}$ (ГОСТ 27888)		Выполнение условий ГОСТ	Уставки на срабатывание защиты				Контроль т/детектора $\theta_{1\text{,лоб}}$		Контроль статора θ_1		Контроль ротора θ_2	
		Категория 1	Категория 2		$\theta_{\text{реле}} = \nabla_{\text{реле}} - \nabla_{\text{окр}}$	$\theta_{\text{тд}} = \nabla_{\text{тд}} - \nabla_{\text{окр}}$	$\theta_{1\text{,обм.доп}}$	$\theta_{2\text{,обм.доп}}$	Данные термореле	Измеренная температура	Действительная температура	Защита	Действительная температура	Защита
I	Медленно	195	21 5	+		14 0	13 5	25 0	13 7	140	15 0	+	15 7	+
	Быстро	250	27 5	-		14 0	13 5	25 0	15 3	140	32 5	-	18 2	+
II	Медленно	195	21 5	+	13 0		13 5	25 0	12 2	126	13 3	+	13 2	+
	Быстро	250	27 5	+	13 0		13 5	25 0	21	26	13 3	+	22 0	+

Работа температурной защиты для медленно нарастающей нагрузки.

Динамику процесса иллюстрирует рис.2. В первом варианте работы защиты, при достижении температурой термодетектора своего порогового значения $\theta_{\text{тд}} = \square_{\text{тд}} - \square_{\text{окр}} = 170 -$

⁵ По согласованию с заводом-изготовителем (ОАО Первомайский электромеханический завод им. К.Маркса)

⁶ Согласно указаниям ГОСТ 183-74 $\vartheta_{\text{окр}}=40^\circ\text{C}$, но в технических условиях на двигатель может быть указано иное значение.

$30=140\text{ }^{\circ}\text{C}$, температури лобової частини обмотки статора $\theta_{1, \text{лоб}}$ і обмотки ротора θ_2 не перевищують значення максимальної температури спрацьовування для першої категорії захисту, рівної $195\text{ }^{\circ}\text{C}$ (табл.1).

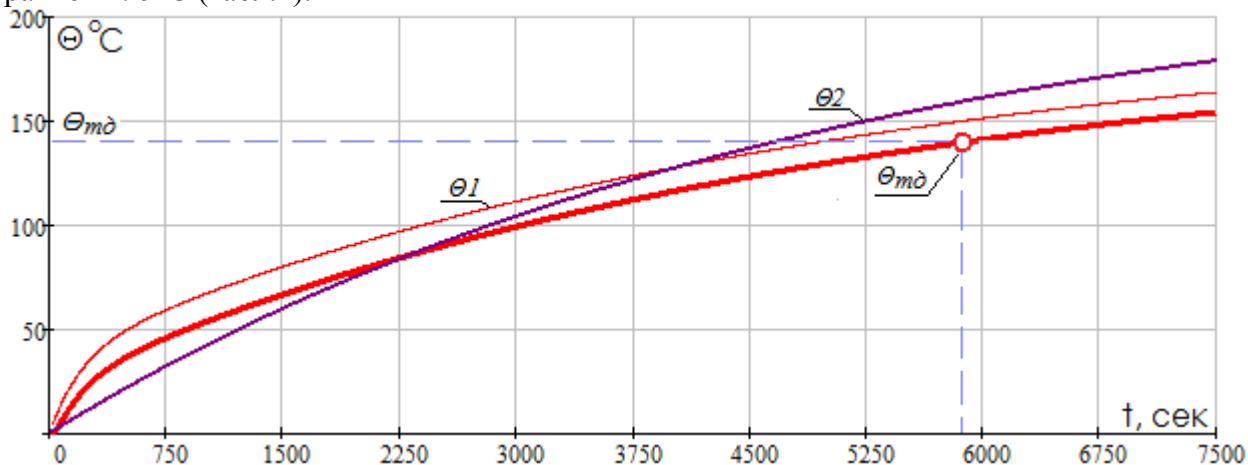


Рисунок 2 – Изменение во времени действительных температур статора θ_1 , ротора θ_2 и показаний термодетектора $\theta_{m\partial}$ при медленно изменяющейся тепловой перегрузке. Первый вариант работы защиты – от термодетектора ($t_{cp}=5880\text{ с.}$)

Для второго варианта работы защиты, при данных реле о температуре обмотки статора $\theta_{реле}=130\text{ }^{\circ}\text{C}$, действительные температуры в статоре $\theta_1=133\text{ }^{\circ}\text{C}$ и роторе $\theta_2=132\text{ }^{\circ}\text{C}$, так же не превышают температуры срабатывания первой категории защиты (Рис.3).

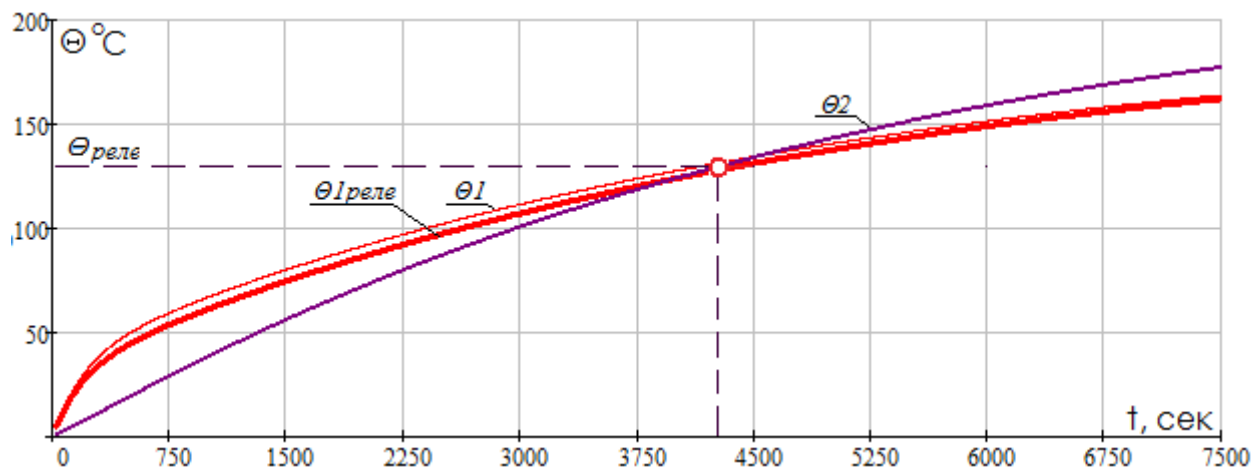


Рисунок 3 – Изменение во времени действительных температур статора θ_1 , ротора θ_2 и показаний реле о температуре статора $\theta_{реле}$ при медленно изменяющейся тепловой перегрузке. Второй вариант работы защиты – от температурного реле ($t_{cp}=4410\text{ с.}$)

Оба варианта защиты являются равноценными и обеспечивают защиту двигателя в соответствии с требованиями ГОСТ 27888-88.

Оценка работы температурной защиты для быстро нарастающей нагрузки.

В первом варианте защиты, при достижении температуры датчика порога срабатывания защиты ($140\text{ }^{\circ}\text{C}$), максимальная температура в двигателе – в лобовой части обмотки статора достигает значения $\theta_1=325\text{ }^{\circ}\text{C}$, что превышает порог срабатывания реле $\theta_{реле}=130\text{ }^{\circ}\text{C}$ и превосходит температуру срабатывания защиты $\theta_{из.дон2}=250\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Как и следовало ожидать, первый вариант работы защиты не удовлетворяет требованиям ГОСТ – температура термодатчика отстаёт от роста реальной температуры контролируемой точки (Рис.4).

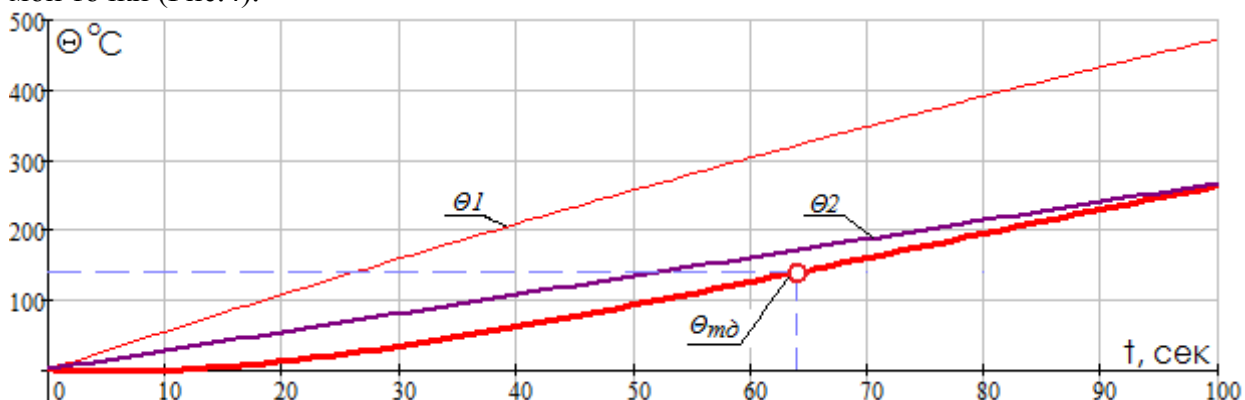


Рисунок 4 – Изменение во времени действительных температур статора θ_1 , ротора θ_2 и показаний термодетектора θ_{md} при быстро изменяющейся тепловой перегрузке. Первый вариант работы защиты – от термодетектора ($t_{cp}=64$ с.)

Для второго варианта защиты, при данных реле о температуре лобовой части обмотки статора $\theta_{реле}=130$ °С, действительная температура в двигателе составляет $\theta_1=133$ °С и не превосходит допустимую температуру (250 °С). Значит, второй вариант работы защиты удовлетворяет требованиям ГОСТ 27888-88 (Рис.5).

Для защиты обмотки ротора, при расчетной температуре $\theta_{2,реле}=250$ °С, действительная температура в роторе равна $\theta_2=220$ °С, что не превышает принятую допустимую температуру. Защита ротора от превышения температуры при быстро нарастающей перегрузке удовлетворяет поставленным требованиям к защите.

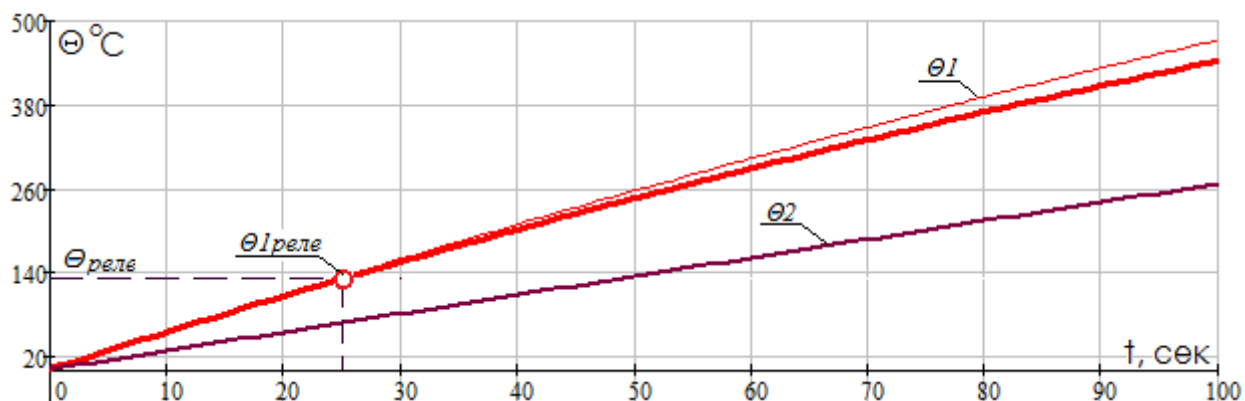


Рисунок 5 – Изменение во времени действительных температур статора θ_1 , ротора θ_2 и показаний реле о температуре статора $\theta_{1,реле}$ при быстро изменяющейся тепловой перегрузке. Второй вариант работы защиты – от температурного реле ($t_{cp}=25$ с.)

Выводы.

Предлагаемое температурное реле соответствует поставленным требованиям к встроенной защите вращающихся низковольтных электрических машин и способно решить задачи по предотвращению работы двигателя при:

- недопустимом повышении температуры окружающей среды;
- недопустимом снижении / повышении питающего напряжения;
- заклинивании вала двигателя;
- перегрузке по току в рабочем режиме;
- попытке повторного пуска из «горячего состояния».

Наличие же микроконтроллера позволяет оперативно адаптировать алгоритм и параметры реле под требования конкретного двигателя и конкретного ТПУ.

Литература

1. Конструкция и технология изготовления роторных стержневых обмоток / А. И. Аниканов, В. В. Каика, Н. Н. Ткачук [и др.] // Взрывозащищённое электрооборудование. Сборник научных трудов УкрНИИВЭ. – 2005. – С. 213-223.
2. Ткачук А. Н. Влияние повышения энерговооруженности скребковых конвейеров на аварийность их приводных электродвигателей / А. Н. Ткачук, А. И. Аниканов // Взрывозащищённое электрооборудование. Сборник научных трудов УкрНИИВЭ. – 2003. – С. 126-134.
3. Загорский А. Низковольтные асинхронные двигатели. Преимущества тиристорных пусковых устройств / А. Загорский, З. Захарова, И. Пар // Новости электротехники. Информационно-справочное издание. – 2008. – №4 (52).
4. Гусаров А.А. Определение температуры элементов тепловой схемы замещения асинхронного двигателя для разработки теплового реле и диагностики / А. А. Гусаров, Е. Б. Ковалёв // – Донецк : Взрывозащищённое электрооборудование. Сборник научных трудов УкрНИИВЭ. – 2009. – С. 155-161.
5. Сивокобыленко В. Ф. Микропроцессорная защита от тепловой перегрузки асинхронных электродвигателей / В. Ф. Сивокобыленко, С. Н. Ткаченко // Научно-прикладный журнал «Технічна електродинаміка». Тема випуску: «Проблеми сучасної енергетики». Ч. 1. – К. : Інститут електродинаміки, НАН України. – 2008. – С 47-52.

Abstract

Gusarow A.A., Kovalev E.B., Gusarow A.A. *Temperature defence of low-voltage asynchronous engine in composition the devices of the smooth starting. The results of embodiment of model of the temperature state of stator are resulted and rotor of low-voltage asynchronous electric motor with the short-circuited rotor of 2ЭДКОФ 250 М4 in the non-stationary modes of operations taking into account the effect of expulsing of current. The combined temperature relay is collected on the base of microcontroller of ATmega16 it is tested on accordance the requirement of ГОСТ which operate and offered to the use in composition the devices of the smooth starting of low-voltage asynchronous engines.*

Keywords: *Fast-growing thermal overload, combined defense, temperature detector, heating of rotor, asynchronous engine, non-stationary mode.*

Анотація

Гусаров О.А., Ковальов Є.Б., Гусаров А.О. *Температурний захист низьковольтного асинхронного двигуна в складі пристрою плавного пуску. Наведені результати втілення моделі температурного стану статорної і роторної обмоток низьковольтного асинхронного електродвигуна з короткозамкнутим ротором 2ЕДКОФ 250 М4 в нестационарних режимах роботи з урахуванням ефекту витіснення струму. Зібране на базі мікроконтролеру Atmega16 комбіноване температурне реле перевірене на відповідність вимогам ГОСТів, що діють на даний час та пропонується до використання в складі пристроїв плавного пуску низьковольтних асинхронних двигунів.*

Ключові слова: *Швидконаростаюче теплове перевантаження, комбінований захист, термодетектор, нагрів обмотки ротора, асинхронний двигун, нестационарний режим.*

Здано в редакцію:
24.03.2010 г.

Рекомендовано до друку:
д.т.н., проф. Федоров М.М.