

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

УДК 621. 313.33.043.2.536

[https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-3\(48\)-41-51](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-3(48)-41-51)Бочкарев И.В.¹, Брякин И.В.², Храмшин В.Р.³, Сандыбаева А.Р.¹¹ Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, г. Бишкек, Кыргызстан² Институт машиностроения и автоматики Национальной академии наук Кыргызской Республики, г. Бишкек, Кыргызстан³ Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

РАЗРАБОТКА СИСТЕМ ЗАЩИТЫ ОТ ПЕРЕГРЕВА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Проведен анализ известных методов и систем тепловой защиты электродвигателей. Показано, что наиболее перспективными из них являются методы, основанные на контроле активного сопротивления обмотки статора электродвигателя, величина которого однозначно определяется ее температурой. Однако такие методы требуют или ввод постоянного измерительного тока, или выделения указанных параметров алгоритмическим путем из рабочих переменных величин. Предложен новый способ тепловой защиты электродвигателей переменного тока. Способ основан на том, что изменение активной и/или реактивной составляющих импеданса обмотки вследствие изменения ее температуры вызывает соответствующее изменение угла между векторами фазных напряжений и токов. Это позволяет осуществлять тепловую защиту путем контроля изменения указанного угла. Разработан соответствующий вариант структурной блок-схемы устройства, реализующего предложенный способ тепловой защиты. Проведены экспериментальные исследования, результаты которых подтвердили работоспособность и эффективность предложенного технического решения.

Ключевые слова: электродвигатель переменного тока, тепловая модель, устройство плавного пуска, активное сопротивление обмотки статора, синхронный детектор, синфазная и квадратурная составляющие напряжения питания, разность фаз между векторами напряжения и тока.

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что основу подавляющего большинства современных электроприводов составляют электродвигатели переменного тока (ЭД), чаще всего асинхронные двигатели (АД) [1]. По статистике отказы ЭД чаще всего возникают вследствие теплового разрушения изоляции статора за счет перегрузок, повышения температуры окружающей среды, нарушения условий охлаждения и т.п. Это обусловлено тем, что нагрев изоляции приводит к изменению ее физического состояния: диэлектрик при повышении температуры становится менее твердым и тем самым более подвержен механическим повреждениям. Кроме того, при тепловом воздействии происходит высыхание изоляции, что приводит к трещинам и скалыванию изолирующего слоя и, соответственно, к электрическому пробоя [2].

Очевидно, что выход из строя практически любого электродвигателя приводит к сбоям работы электропривода в целом. Следовательно, все приводные ЭД должны быть снабжены устройствами тепловой защиты, способной эффективно и достоверно отслеживать текущую температуру их обмоток и обеспечивать возможность интегрироваться в систему автоматического управления электроприводом.

ОБЗОР НАИБОЛЕЕ РАСПРОСТРАНЕННЫХ СИСТЕМ ТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ

В общем случае любая система тепловой защиты функционально содержит два основных узла:

- контрольно-измерительный узел, выходной сигнал которого характеризует текущую температуру обмотки;

- исполнительный узел, который обрабатывает сигнал, полученный из контрольно-измерительного узла, и с учетом введенной в него дополнительной информации, характеризующей предельно допустимый нагрев, осуществляет в случае недопустимого перегрева отключение электродвигателя от питания и/или осуществляет соответствующую сигнализацию.

При этом конструктивно при аппаратной реализации системы тепловой защиты эти два указанных функциональных узла могут быть объединены в один блок.

Практическая реализация исполнительного узла никаких затруднений не вызывает: он может, в общем случае, содержать электромеханический и логический блоки, причем электромеханический блок может быть выполнен, например, в виде узла релейной защиты на базе электромеханических или электронных реле и пускателей [3].

Очевидно, что основные проблемы при создании системы тепловой защиты заключаются в выполнении контрольно-измерительного узла, от достоверности и точности работы которого зависит корректность и надежность функционирования всей системы тепловой защиты ЭД в целом. Поэтому в данной статье основной упор сделан именно на этот основной узел системы тепловой защиты.

Контрольно-измерительный узел системы тепловой защиты может быть построен или на непосредственном измерении температуры, или на ее косвенном определении путем контроля определенных физических величин, определяющих нагрев обмотки. Соответственно, подходы к выполнению этого узла, используемые в настоящее время на практике при построении систем тепловой защиты, можно разделить на несколько групп:

- косвенные методы по величине тока статора;
- методы, основанные на использовании встроенных термодатчиков;
- методы, основанные на использовании тепловой модели машины;
- методы, основанные на оценке электрических параметров машины;
- гибридные методы, основанные на комбинированном использовании перечисленных методов.

Косвенные методы тепловой защиты, основанные на контроле величины тока статора, широко используются на практике в виде максимально-токовой защиты [4-6]. Очевидно, что при реализации таких методов непосредственное измерение температуры нагрева обмоток статора не осуществляется, следовательно, защита не сработает при существенных перегревах, например при затяжном пуске двигателя под нагрузкой. Кроме того, такой метод защиты не может учесть изменение температуры окружающей среды, а также условий охлаждения и теплообмена. Все это также не позволяет обеспечить надежную тепловую защиту АД.

Наиболее простыми способами тепловой защиты являются способы, базирующиеся на прямом измерении температуры с помощью термодатчиков, встроенных в обмотки машин [7]. Однако этот подход редко используется в электроприводах из-за целого ряда значительных недостатков, основным из которых является необходимость установки термодатчиков еще на этапе изготовления машины. При этом установка термодатчиков в небольшие машины чрезвычайно сложна и требует больших затрат. Значительным недостатком является также то, что термодатчики реагируют только на локальную температуру того места, где они расположены. Кроме того, наличие между датчиком и обмоткой изоляции, обладающей значительной тепловой инерционностью, не позволяет оперативно отключить машину при резком повышении нагрева обмотки. Таким образом, методы, основанные на использовании встроенных термодатчиков, надежную и достоверную тепловую защиту электрической машины, особенно в нестационарных и аварийных режимах работы, не обеспечивают.

Одним из методов определения температуры обмотки при создании ее тепловой защиты является использование тепловой модели электродвигателя (ТМЭД), которая позволяет производить алгоритмический расчет температур различных частей электродвигателя на базе контроля текущего значения тока с использованием конструктивных параметров машины [8, 9]. От структуры и сложности ТМЭД зависит точность расчета температуры, которая повышается при более точном учете тепловых связей всех элементов машины. Однако это вызывает необходимость детального знания всех собственных тепловых параметров, а также очень точного описания процессов нагрева-охлаждения, протекающих в машине, что весьма затрудняет реализацию расчета температуры в реальном времени. Поэтому на практике применяют ТМЭД уменьшенного порядка. Так, в [10] предлагается упрощенная тепловая модель АД, в которой для уменьшения порядка ТМЭД вместо использования сосредоточенной тепловой модели предложен подход на основе передаточной функции. Предложенная тепловая модель требует значительно меньшего количества тепло-

вых параметров для точного моделирования теплового поведения электрической машины переменного тока (ЭМПТ), сохраняя при этом приемлемую точность и достоверность контроля нагрева обмотки ЭМПТ, в целом достаточную для задач тепловой защиты машины, эксплуатируемой в заданных условиях работы. Однако упрощенные ТМЭД не позволяют произвести точную оценку температуры обмотки статора конкретного двигателя с учетом текущих условий его охлаждения, что особенно важно для АД, используемых, например, в неотапливаемых помещениях или на открытом воздухе. В [11] представлена гибридная тепловая модель для учета различий в тепловых рабочих условиях для разных двигателей одинакового номинала и одинаковой системой охлаждения. Посредством теоретического анализа и математического моделирования показана возможность теплового контроля двигателя при изменении условий охлаждения. В этой статье предлагается алгоритм настройки параметров в режиме онлайн, который адаптирует гибридную тепловую модель к изменениям тепловых режимов работы двигателя. Это позволяет обеспечить полную защиту от перегрузки.

Внедрение ТМЭД для тепловой защиты ЭМПТ в режиме реального времени весьма затруднено из-за отсутствия точной информации о фактических условиях работы и охлаждения машины, а определить параметры тепловой модели экспериментальным или расчетным путем очень сложно, причем для ЭМПТ, уже находящихся в эксплуатации, эта информация практически недоступна. Таким образом, массовое использование систем тепловой защиты с использованием ТМЭД больших производственных перспектив не имеет.

Как показал проведенный анализ литературы, в последнее время одними из наиболее перспективных являются методы теплового контроля и защиты, основанные на оценке электрических параметров машины, и в первую очередь, на контроле активного сопротивления обмотки статора R_C , величина которого однозначно определяется ее температурой. Это позволяет использовать непосредственно саму обмотку в качестве термодатчика и по величине изменения R_C вследствие нагрева обмотки определять ее среднюю температуру T по выражению

$$T = \frac{R_{CP} - R_{CH}}{\alpha R_{CH}} + T_X, \quad (1)$$

где R_{CP} – сопротивление в рабочем состоянии; R_{CH} – начальное сопротивление обмотки при известной температуре T_X ; α – температурный коэффициент электрического сопротивления, зависящий от материала обмотки.

Поэтому рассмотрим методы тепловой защиты, основанные на контроле сопротивления обмотки статора R_C , более детально. Наиболее просто величину R_C определять методом «вольтметра – амперметра» путем подачи на обмотку постоянного напряжения:

$$R_C = U_{OC} / I_{OC}, \quad (2)$$

где U_{OC} и I_{OC} – падение напряжения и ток обмотки статора.

При этом совершенно очевидно, что для обеспечения тепловой защиты контроль величины R_1 необходимо

осуществлять непосредственно во время работы АД. Для этого необходимо в цепь рабочего переменного тока ввести небольшой постоянный измерительный ток. В принципе это можно осуществить путем использования дополнительного постороннего источника постоянного тока. Такие способы показаны, например, в [12, 13]. Однако такой подход эффективен для устройств измерения температуры в лабораторных условиях при тепловых испытаниях электрооборудования переменного тока [14], а для задач тепловой защиты эти способы экономически не выгодны.

Возможность формирования постоянного тока из рабочего переменного тока впервые была предложена в [15], а применение такого способа в системе теплового контроля описано в [16] и показано на **рис. 1**.

Устройство имеет: 1 – термодатчик в виде обмотки ЭМ; 2 – блок ввода постоянного тока; 3 – измерительный шунт; 4 – блок измерения величины измерительного постоянного тока $I_{изм}$; 5 – блок измерения величины падения напряжения на термодатчике 2 от тока $I_{изм}$; 6 – вычислительный блок; 7 – пороговый элемент и 8 – исполнительный орган. Видно, что за счет неравенства сопротивлений для разных полуовн питающего напряжения в цепи будет присутствовать постоянный ток $I_{изм}$, величину которого можно регулировать путем изменения сопротивления резистора $R_{рег}$.

Блок 6 осуществляет расчет текущей температуры T обмотки на базе выражений (1) и (2) и если она превышает допустимую по условиям эксплуатации температуру $T_{доп}$, то пороговый элемент формирует выходной сигнал, который поступает на исполнительный орган 8, отключающий обмотку от цепи питания U_C . Основная трудность при практической реализации данного решения заключается в необходимости устранения влияния рабочего тока на измерительные цепи.

Вопросам формирования постоянного измерительного тока непосредственно из рабочего переменного тока в настоящее время посвящено большое количество работ. Так, в [17, 18] представлен обзор соответствующих современных методов тепловой защиты для двигателей переменного тока с линейным запуском, с плавным пуском и инверторным питанием. Эти активные методы тепловой защиты контролируют среднюю температуру статора посредством оценки сопротивления статора, используя только измерения напряжения и тока статора двигателя, и используют различные способы формирования измерительного постоянного напряжения. Рассмотрим основные из них.

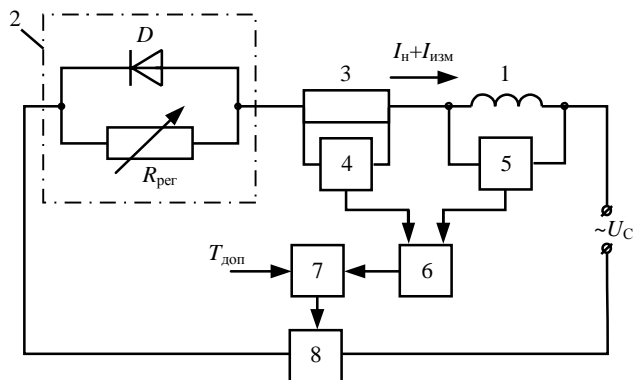


Рис. 1. Принципиальная блок-схема устройства тепловой защиты при формировании измерительного тока из рабочего переменного тока

В [19-21] показано, что ввод сигналов постоянного тока можно обеспечить путем использования полевого МОП-транзистора с изолированным затвором MOSFET и сопротивления R (**рис. 2**).

Эквивалентное сопротивление цепи ввода постоянного тока изменяют путем управления переключением MOSFET, когда ток течет в разных направлениях. Фактически подаваемое напряжение постоянного тока можно контролировать, регулируя сопротивление R в цепи ввода сигнала.

Контроль величины сопротивления обмотки статора АД, которые подключены к сети посредством устройства плавного пуска (Soft-Starter), описан в [22-25]. Постоянный измерительный ток вводится путем изменения угла задержки тириستоров Soft-Starter (**рис. 3**).

Уровень вводимого сигнала постоянного тока регулируется величиной угла задержки. Сигнал управления затвором устройства плавного пуска вызывает короткую задержку в полупериодическом цикле для одной фазы машины. Затем компоненты постоянного тока получают из анализа Фурье по току и напряжению. Используя величину сигналов постоянного тока, рассчитывают сопротивление и температуру обмотки статора. Для получения точной температуры обмотки статора полученные значения предлагается обрабатывать по специальной программе совместно с другими параметрами.

Тепловая защита электродвигателей с питанием от инвертора описана в [26-28]. В приводе двигателя с разомкнутым контуром напряжение постоянного тока периодически вводится в двигатель путем изменения пространственной векторной широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Для ввода измерительного сигнала предлагается модифицированная схема ШИМ пространственного вектора, которая позволяет автоматически вводить компоненты постоянного тока в дополнение к исходным силовым сигналам напряжения, изменяя переключение переключателей силовой электроники.

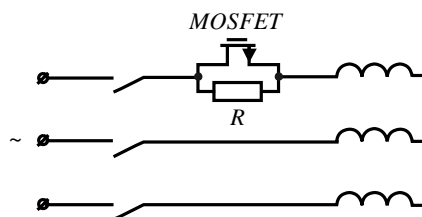


Рис. 2. Схема ввода измерительного постоянного тока путем использования полевого МОП-транзистора

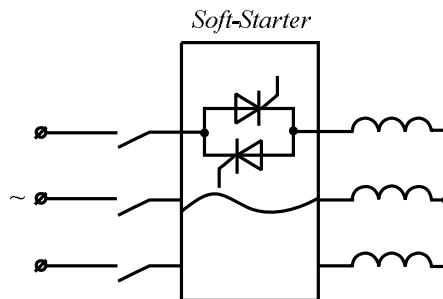


Рис. 3. Схема ввода измерительного постоянного тока при использовании в схеме управления АД устройства плавного пуска

Однако необходимо отметить, что ввод любым способом дополнительного измерительного постоянного тока в обмотку статора приводит к определенному изменению показателей ЭД. В частности, возникают пульсации крутящего момента и отрицательный крутящий момент, вызванный составляющей постоянного тока [19]. Поэтому требуется выделить компоненты постоянного тока от фазных токов и напряжений. Соответствующие методики представлены в [29, 30]. Кроме того, наличие постоянного тока изменяет условия нагрева машины. Для уменьшения дополнительного тепловыделения в электродвигателе за счет протекания постоянного измерительного тока можно, например, в схемах с использованием устройств плавного пуска, сигналы этого тока вводить с перерывами. Такие перерывы могут составлять около 3-5 минут, в зависимости от типа двигателя и условий его эксплуатации. Для этого после каждой подачи сигнала постоянного тока и, соответственно, процедуры контроля нагрева обмотки обмотка питается «чистым» переменным рабочим напряжением. Тепловая защита АД при этом практически не пострадает вследствие тепловой инерционности машины. Однако все указанные процедуры приводят к повышению сложности устройств тепловой защиты АД.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Как показал проведенный анализ, известные методы, основанные на измерении изменения величины активного сопротивления обмотки статора вследствие ее нагрева, не обеспечивают точного контроля температуры обмотки без нарушений нормальной работы машины. Очевидно, что оптимальным методом тепловой защиты является метод, не требующий ввода дополнительного измерительного постоянного тока. Один из возможных путей решения этой задачи описан в [31], где предложен способ оперативного контроля температуры, который базируется на измерении сопротивления обмоток ЭД переменного тока в рабочем режиме ЭД путем выделения соответствующих компонентов из фазных напряжений и токов при помощи синхронных детекторов [32, 33]. Для контроля величины активного сопротивления обмотки используются два независимых «асимметричных» измерительных канала, осуществляющих измерение активных составляющих тока и напряжения обмотки и последующее вычисление ее сопротивления. Для контроля тока в цепь обмотки 2 (рис. 4) вводится датчик тока в виде измерительного шунта 1 с эталонным активным сопротивлением.

Регистрирующие блоки 3 и 4 выполнены в виде амплитудных детекторов, а третий регистрирующий блок – в виде фазового детектора. Первый вычислительный блок 6 представляет собой аналоговый перемножитель сигналов, а второй вычислительный блок 7 – аналоговый делитель двух сигналов. Регистрирующий блок 3 на выходе формирует электрический сигнал, пропорциональный амплитудному значению тока в цепи. Блок 5 формирует электрический сигнал, пропорциональный $\cos\varphi$. В блоке 6 электрические сигналы с блоков 5 и 4 перемножаются, за счет чего на выходе формируется электрический сигнал, пропорциональный амплитудному значению активной составляющей падения напряжения на сопротивлении обмотки 2.

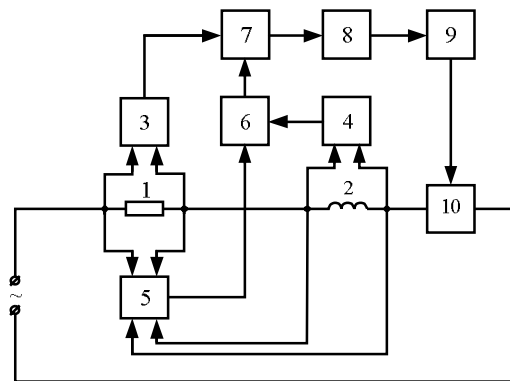


Рис. 4. Принципиальная блок-схема устройства тепловой защиты, реализующая процедуру извлечения компонентов постоянного тока из переменных фазных напряжений и токов: 1 – измерительный шунт; 2 – обмотка – термодатчик статора; 3, 4 и 5 – первый, второй и третий регистрирующие блоки; 6 и 7 – первый и второй вычислительные блоки; 8 – блок регистрации температуры обмотки; 9 – блок сравнения; 10 – исполнительный орган

Блок 7 осуществляет аналоговое вычисление текущей величины сопротивления обмотки 2 и, таким образом, с учетом (1) алгоритмическое определение ее температуры. Эта температура проходит в блоке 9 процедуру сравнения с допустимым значением нагрева и при необходимости подает сигнал на исполнительный орган 10.

Однако наличие шунта 1, включенного последовательно в силовую цепь обмотки 2, имеет ряд недостатков, основными из которых являются потери мощности в шунте, приводящие к его нагреву, а также наличие гальванической связи с рабочей цепью.

Таким образом, видно, что задача тепловой защиты ЭД в полном объеме не решена и требуется разработка новых принципов построения систем защиты без нарушения нормального режима работы.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В рассмотренных выше системах теплового контроля в качестве физической величины, характеризующей величину нагрева обмотки, использовалось ее активное сопротивление, численное значение которого однозначно определяет температуру обмотки в соответствии с выражением (1). Однако необходимость контроля величины активного сопротивления обмотки требует, в соответствии с выражением (2), измерения величины падения напряжения U_{OC} и тока I_{OC} обмотки статора, для чего необходим или ввод постоянного измерительного тока, или использование измерительного шунта с последующим выделением соответствующих параметров алгоритмическим путем из U_{OC} и тока I_{OC} . Это в значительной степени усложняет практическую реализацию такого подхода к контролю температуры, приводит к нарушению режима работы ЭД и тем самым снижает надежность работы всей системы в целом. С целью устранения указанных недостатков предлагается новый подход к построению систем оперативного контроля температуры, предназначенный для обеспечения тепловой защиты ЭД. В основу данного подхода были положены методы графической интерпретации и аналитического обобщения априорной информации о функциональных связях между измеряемыми величинами в виде соответствующих фазовых соотношений.

Согласно предлагаемому способу осуществляется косвенный способ контроля теплового состояния обмотки статора ЭД, основанный на результатах прямых измерений и последующем алгоритмическом вычислении физической величины, функционально связанной с искомой величиной, а именно разности фаз φ между векторами \dot{U} и \dot{I} , зависящей от величин активной r и реактивной x составляющих импеданса обмотки статора ЭД, численные значения которых зависят от нагрева этой обмотки. Обобщая, можно констатировать, что предлагаемый способ контроля фактически основан на следующем свойстве разности фаз φ между векторами \dot{U} и \dot{I} : $\varphi = f[r(T); x(T)] = F(T)$.

Рассмотрим в системном изложении обоснование сущности предлагаемого нового способа теплового контроля измерения составляющих полного сопротивления обмотки статора ЭД и особенности работы устройства для его реализации.

Схему включения ЭД в питающую электросеть можно представить в виде неразветвленной цепи синусоидального тока (рис. 5): 1 – источник питающего сетевого напряжения; 2 – обмотка статора ЭД; 3 – управляемое устройство коммутации; F_y – управляющий сигнал, подключающий или отключающий ЭД к источнику питающего сетевого напряжения.

Измеряя напряжение питания обмотки статора (ОС) ЭД и ток в цепи этой обмотки, можно определить импеданс ОС ЭД, воспользовавшись следующим выражением:

$$\dot{Z} = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = \frac{Ue^{j\psi_U}}{Ie^{j\psi_I}} = \frac{U}{I}e^{j\varphi} = Ze^{j\varphi} = r + jx, \quad (3)$$

где \dot{U} и \dot{I} – комплексные действующие значения напряжения и тока в цепи обмотки; ψ_U – угол между вектором \dot{U} и вещественной осью на комплексной плоскости; ψ_I – угол между вектором \dot{I} и вещественной осью на комплексной плоскости; $\varphi = \psi_U - \psi_I$ – угол (разность фаз) между векторами \dot{U} и \dot{I} ; r – активная составляющая импеданса ОС ЭД; $x = \omega \cdot L$ – реактивная составляющая импеданса ОС ЭД; ω – циклическая частота напряжения питания ОС ЭД; $L = F(\mu, \{Q_i\})$ – индуктивность ОС ЭД; μ – магнитная проницаемость материала статора ЭД; $\{Q_i\}$ – набор конструктивных параметров ОС и самого статора ЭД.

Для анализа особенностей физических процессов, происходящих в рассматриваемой электрической цепи, построим соответствующую векторную диаграмму напряжений на комплексной плоскости (рис. 6).

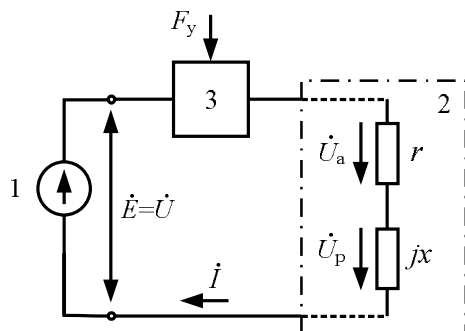


Рис. 5. Обобщенная блок-схема включения ЭД

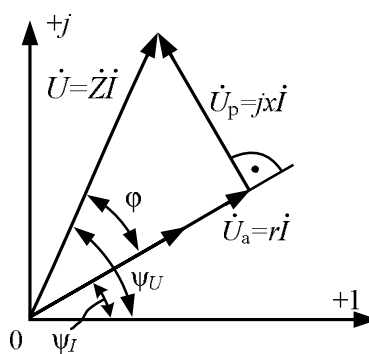


Рис. 6. Векторная диаграмма напряжений

В соответствии с (3) и рис. 2 можем записать следующее уравнение цепи:

$$\dot{U} = \dot{I}\dot{Z} = \dot{I}r + j\dot{I}x = \dot{U}_a + \dot{U}_p, \quad (4)$$

где $\dot{U}_a = \dot{I}r$ – напряжение на внутреннем активном сопротивлении ОС ЭД; $\dot{U}_p = j\dot{I}x$ – напряжение на внутреннем реактивном сопротивлении ОС ЭД.

Совместим вектор тока электрической цепи с вещественной осью координат на комплексной плоскости (рис. 7).

Из анализа выражения (4) и рис. 7 следует, что при совмещении вектора тока \dot{I} с вещественной осью координат комплексной плоскости вектор \dot{U} напряжения питания условно можно разложить по отношению к фазе тока \dot{I} на синфазную (вещественную) \dot{U}_C и квадратурную (мнимую) \dot{U}_K составляющие:

$$\begin{aligned} \dot{U} &= U \cos \varphi + jU \sin \varphi = Ir + jIx = \\ &= U_C + jU_K, \end{aligned} \quad (5)$$

причем $U_a = U_C$; $U_p = jU_K$.

Следует отметить, что удельное сопротивление материала ОС является функцией температуры и в линейном приближении определяется зависимостью вида

$$\rho = \rho_0 [1 + \alpha_\rho (T - T_0)], \quad (6)$$

где ρ_0 и α_ρ – удельное сопротивление и температурный коэффициент удельного сопротивления, отнесенные к началу температурного диапазона T_0 ; ρ – удельное сопротивление при температуре T .

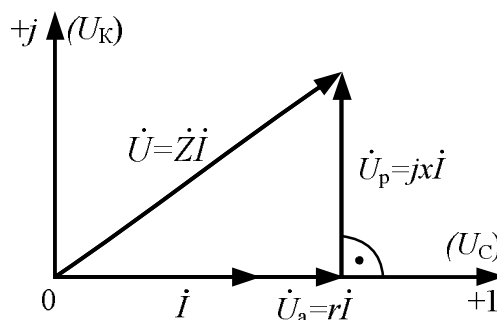


Рис. 7. Трансформированная векторная диаграмма напряжений

В свою очередь, известно, что для индуктивности L ОС одним из параметров, зависящим от температуры, является μ , для которого существует следующая зависимость:

$$\mu = \mu_0 \left[1 + \frac{\alpha_\mu}{T - T_0} \right], \quad (7)$$

где μ_0 и α_μ – магнитная проницаемость и температурный коэффициент магнитной проницаемости, отнесенные к началу температурного диапазона T_0 ; μ – магнитная проницаемость при температуре T .

Важным является тот факт, что из выражений (4) и (5) следует факт наличия разнонаправленных трендов в изменениях r и x при воздействии на эти параметры колебаний температуры.

В соответствии с выражением (5) и сделанными выше замечаниями можно сделать вывод о том, что любое изменение активной r или реактивной x составляющей импеданса ОС ЭД при изменении температуры ОС ЭД вызовет соответствующее изменение угла φ между векторами \dot{U} и \dot{I} на комплексной плоскости.

Иными словами, между углом φ и температурой T ОС ЭД существует явная функциональная зависимость, определяемая соотношением между x и r :

$$\varphi = \arctg \frac{x}{r} = \arctg \frac{U_{\kappa}}{U_c} = F(T). \quad (8)$$

При изменении температуры T конец вектора \dot{U} будет перемещаться на комплексной плоскости по окружности радиусом $R = U = \text{const}$ с центром в точке 0 и занимать положение, соответствующее отношению U_{\Re}/U_{\Im} . Причем наличие в изменениях r и x под воздействием температуры разнонаправленных трендов обеспечит в соответствии с (6) существенные изменения φ .

Из выражений (5) и (8) видно, что для решения поставленной задачи, т.е. для контроля температуры ОС ЭД, достаточно регистрировать состояние разности фаз φ между векторами \vec{U} и \vec{I} . Используя синхронизацию обработки сигналов по фазе тока в неразветвленной цепи, можно аппаратными средствами регистрировать действующие значения квадратурной U_k и синфазной U_c составляющих напряжения питания \vec{U} , а значит, и определить текущее значение $\varphi_i = F(T_i)$ с целью обеспечения тепловой защиты ЭД. Фактически речь идет о возможности реализации нового фазового метода контроля температуры ОС ЭД.

Для осуществления рассматриваемого метода контроля температуры ОС ЭД предлагается соответствующий вариант структурной блок-схемы устройства тепловой защиты ЭД (**рис. 8**): 1 – источник питания ОС ЭД; 2 – ОС ЭД, используемая в качестве термодатчика; 3 – устройство коммутации ОС ЭД; 4 – измерительный трансформатор тока (ИТТ); 5 – преобразователь тока в напряжение; 6 – аттенуатор-регистратор; 7 – фазовращатель; 8 – формирователь квадратурных опорных напряжений; 9 и 10 – синхронные детекторы соответственно синфазной и квадратурной составляющих напряжения питания ОС ЭД; 11 – логотрический преобразователь с цифровым выходом; 12 – цифровой компаратор; 13 – блок задания уровня компарации; 14 – формирователь управляющего сигнала.

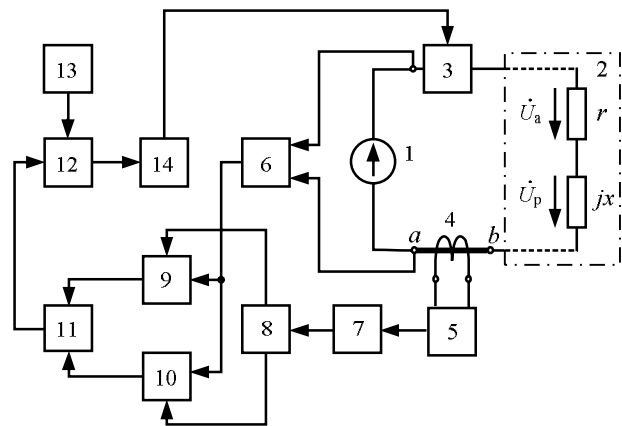


Рис. 8. Блок-схема устройства для тепловой защиты ЭД

Рассмотрим особенности функционирования предлагаемого устройства тепловой защиты ЭД. В исходную неразветвленную цепь синусоидального тока (см. **рис. 5**) в качестве датчика электрического тока добавлен ИТТ, измерительная шина которого через соответствующие контактные разъемы *a* и *b* замыкает электрическую цепь (см. **рис. 8**).

При включении устройства коммутации 3 под действием синусоидального напряжения питания $u = U_m \sin(\omega t + \psi_U)$, с соответствующим комплексным значением напряжения $\dot{U} = U e^{j\psi_U}$, в замкнутой электрической цепи возникает электрический ток $i = i_m \sin(\omega t + \psi_I)$, с соответствующим комплексным значением тока $\dot{I} = I e^{j\psi_I}$.

Измерительной обмоткой ИТТ регистрируется ток $\dot{I}^* = K_{\text{ИТТ}} \dot{I}$, который посредством блока 5 преобразуется в напряжение

$$\dot{U}^* = M^* \dot{I}^* = M^* K_{TT} \dot{I}, \quad (9)$$

где K_{TT} – коэффициент трансформации ИТТ; M^* – размерный коэффициент.

Посредством фазовращателя 7 векторная исходная диаграмма напряжений (см. **рис. 6**) трансформируется в рабочую векторную диаграмму напряжений (см. **рис. 7**) и корректируется фазовая погрешность предыдущих преобразований регистрируемого сигнала. После чего блоком 8 из скорректированного входного сигнала \dot{U}^* формируются соответствующие квадратурные опорные напряжения для синхронных детекторов:

$u_{OC} = U_{mOC} \cos(\omega t + \psi_0)$ – синфазное опорное напряжение;

$$u_{OK} = U_{mOK} \sin(\omega t + \psi_0) \quad - \text{квadrатурное опорное напряжение,}$$

где ψ_0 – фаза опорных напряжений, синхронизированная с фазой ψ , тока электрической цепи.

Для трансформированных координат комплексной плоскости можем записать:

$$\dot{U}=Ue^{j\varphi}; \quad \dot{I}=I. \quad (10)$$

Фактически синхронные детекторы 9 и 10 являются когерентными преобразователями, осуществляющими операции перемножения входного информационного сигнала с входным опорным напряжением с последующей низкочастотной фильтрацией полученного после перемножения сигнала.

В соответствии с (10) блок 6 масштабирует питающее сетевое напряжение $u = U_m \sin(\omega t + \varphi)$ до уровня

$u^* = K_M U_m \sin(\omega t + \varphi)$, которое затем подается на информационные входы синхронных детекторов 9 и 10, где и происходит его необходимое преобразование, в результате которого на выходе синхронных детекторов 9 и 10 получаем следующие соответствующие сигналы:

$$\begin{aligned} U_C &= K_{сд} K_M U_m \cos(\psi_0 - \varphi); \\ U_K &= K_{кд} K_M U_m \sin(\psi_0 - \varphi), \end{aligned} \quad (11)$$

где U_C и U_K – соответственно синфазная и квадратурная составляющие напряжения питания; $K_{сд}$ и $K_{кд}$ – коэффициенты преобразования соответственно синхронного детектора 9 и синхронного детектора 10; K_M – коэффициент масштабирования блока 6.

Блок 11 осуществляется преобразование входных сигналов U_C и U_K путем вычислительной процедуры в соответствии с выражением

$$\Theta(\varphi) = \arctg \frac{U_K}{U_C}. \quad (12)$$

Кроме того, блоком 11 дополнительно осуществляется операция аналого-цифрового преобразования $\Theta(\varphi)$:

$$\Phi: [\Theta(\varphi)] \rightarrow \Theta_{ц}(n/f_d), \quad (13)$$

где Φ – оператор аналого-цифрового преобразования; n/f_d – функция дискретного времени, f_d – частота дискретизации сигнала, $n=0, 1, 2, \dots$.

С выхода блока 11 цифровой сигнал $\Theta_{ц}(n/f_d)=F(T)$ поступает на блок 12, который сравнивает $\Theta_{ц}(n/f_d)=F(T)$ с заданным эталонным значением $\Theta_{ц}^*(n/f_d)=F^*(T)$, выдаваемым блоком 13.

По результатам операции сравнения блоком 12 вырабатывается бинарный D -сигнал уровня логического 0 или 1, исходя из следующих условий:

$$D = \begin{cases} 1, & \text{при } \Theta_{ц}(n/f_d) \geq \Theta_{ц}^*(n/f_d); \\ 0, & \text{при } \Theta_{ц}(n/f_d) < \Theta_{ц}^*(n/f_d). \end{cases} \quad (15)$$

В дальнейшем сигнал D поступает на вход блока 14, который в зависимости от состояния сигнала D формирует необходимый управляющий сигнал для устройства коммутации 3.

При критической ситуации, когда уровень выходного сигнала блока 12 $D=1$, т.е. температура перегрева ЭД T превышает допустимое значение T^* , блок 3 отключает ОС ЭД от источника сетевого напряжения, предотвращая тем самым аварийную ситуацию на эксплуатируемом электротехническом оборудовании.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА РАЗРАБОТАННОГО УСТРОЙСТВА

Эксперименты проводились с использованием двух одинаковых асинхронных ЭД типа 4А63В4 мощностью 0,37 кВт. При этом показатели одного из (базового) принимались в качестве критерия оценки точности результатов, полученных на втором ЭД (испытуемом). Питание обоих электродвигателей осуществлялось от сети переменного напряжения 380 В. Все измерительные процедуры выполнялись при холостом ходе в режиме S1 при установившемся тепловом режиме.

Для проведения экспериментальных исследований был разработан специализированный испытательный стенд, структурная блок-схема которого представлена на **рис. 9**: 1 – испытательная камера; 2 – регулируемый калорифер; 3 – базовый ЭД; 4 – испытуемый ЭД; 5 – силовой выключатель; 6 – устройство для тепловой защиты ЭД, реализующее новый фазовый метод контроля температуры ОС ЭД; 7 – система сбора данных Е502 производства «ЛКард», 8 – малогабаритный электронный термометр (МЭТ) с выносным цифровым термодатчиком 9; 10 – персональный компьютер (ПК).

Регулировкой калорифера 3 задавались различные температурные режимы среды в испытательной камере 1 с находящимися на нем ЭД 3 и 4, для которых осуществлялись измерения температуры их ОС посредством соответственно МЭТ и устройства для тепловой защиты ЭД 6. Полученные по результатам этих измерений данные регистрировались ПК 10 с соответствующим аппаратно-программным интерфейсом и сравнивались между собой, после чего проводился окончательный анализ результатов экспериментальных исследований.

В качестве измерителя температуры использовался специально разработанный для этой цели малогабаритный электронный термометр (МЭТ) 8 с выносным цифровым термодатчиком 9, подключенный к USB-порту персонального компьютера (ПК) (**рис. 10**).

Особенность данного МЭТ заключается в том, что его работой управляет микроконтроллер (МК) PIC18F14K50, имеющий встроенный модуль USB, а в качестве чувствительного термoelementa используется цифровой датчик (ЦД) LM75AD, подключаемый к МК посредством экранированной витой пары длиной 5 м ($Z=90$ Ом). В МЭТ также предусмотрена световая индикация контроля его рабочего режима посредством соответствующего светодиода.

Для обеспечения нормального функционирования МЭТ в ПК устанавливался соответствующий программный драйвер, создающий виртуальный COM-порт с определенным режимом работы: восемь информационных разрядов без контроля четности и один стоповый, а также автоматическое определение скорости обмена информацией.

По умолчанию опрос МК осуществлялся каждые 5 с, а в режиме «по запросу компьютера» ввод информации производится не чаще одного раза в секунду. Для компенсации систематической погрешности в программе предусмотрена возможность ввода и изменения необходимой поправки, позволяющей увеличивать или уменьшать показания МЭТ с шагом $0,1^\circ\text{C}$.

Контактным методом измерялась температура выступающих лобовых частей ОС базового ЭД посредством специальным образом закрепленного на них ЦД.

В процессе эксплуатации МЭТ показал достаточно высокие точностные параметры: погрешность измерений в пределах всего рабочего диапазона температур $10...+125^\circ\text{C}$ не превышала 1°C .

Система сбора данных Е502 производства «ЛКард», посредством которой обеспечивалось совместное функционирование ПК с устройством для тепловой защиты ЭД, представляет собой универсальный 16-битный модуль ввода/вывода до 32 аналоговых и 17 цифровых сигналов в персональный компьютер через интерфейсы USB 2.0 (high-speed) и Ethernet (100 Мбит) с частотой преобразования до 2 МГц и возможностью их цифровой обработки в реальном времени.

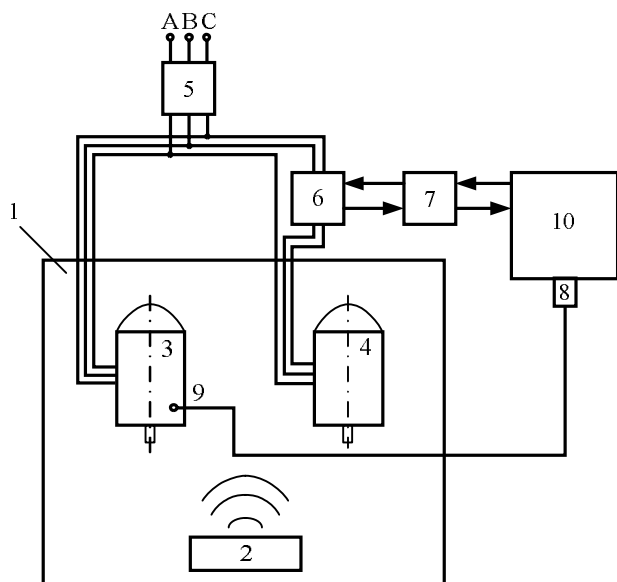


Рис. 9. Блок-схема испытательного стенда

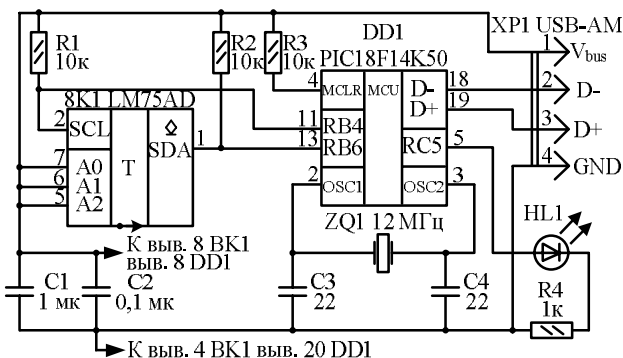


Рис. 10. Принципиальная электрическая схема МЭТ

ПК посредством системы сбора данных 7 фактически осуществлял развертывающее сканирование результата измерения блоком 6 фазы φ между параметрами \dot{U} и \dot{I} путем формирования последовательного перебора возможных значений этой фазы. В случае совпадения результата измерения блоком 6 и задаваемого ПК текущего цифрового значения фазы происходило фиксирование данного значения, по которому и определялась температура в соответствии с градуировочной характеристикой $\varphi=F(T)$.

Следует отметить, что значения всех необходимых коэффициентов и вариант градуировочной характеристики $\varphi=F(T)$ определялись на стадии предварительной калибровки измерительных каналов устройства для тепловой защиты ЭД и размещались в памяти ПК для последующего использования в процессе проведения экспериментальных исследований.

Результаты экспериментальных исследований представлены на рис. 11. На рисунке обозначены $T_{\text{УТЗ}}$ – температура ОС ЭД, регистрируемая устройством тепловой защиты ЭД; $T_{\text{МЭТ}}$ – температура, измеренная малогабаритным электронным термометром; 1 – график, представляющий результаты измерений температуры ОС базового ЭД посредством МЭТ; 2' и 2'' – графики, отражающие результаты многократных измерений температуры ОС испытуемого ЭД устройством тепловой защиты ЭД; $2\Delta_i$ – диапазон разброса значений температуры ОС испытуемого ЭД, измеренной устройством тепловой защиты ЭД.

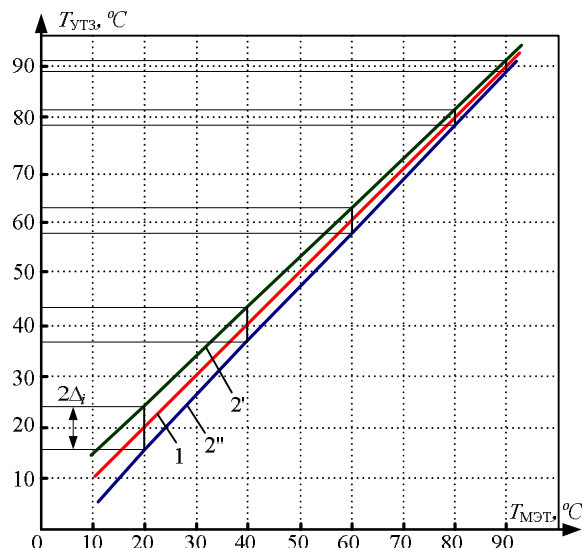


Рис. 11. Результаты экспериментальных исследований фазового метода контроля

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ графической интерпретации результатов экспериментальных исследований показывает, что предлагаемый новый фазовый метод контроля температуры ОС ЭД имеет возможность конкретной технической реализации и обеспечивает вполне приемлемую точность измерений температуры ОС ЭД в требуемом диапазоне ее изменений (5-3% в диапазоне 10-125°C).

В заключение следует отметить, что предложенный способ тепловой защиты может быть применен не только для ЭД, но и для защиты любого другого электрооборудования переменного тока, например генераторов, трансформаторов, реакторов, электромагнитов и т.п.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кисаримов Р.А. Электропривод: справочник. М.: РадиоСофт, 2012. 352 с.
2. Контроль состояния изоляции электрических машин в эксплуатации / Г.А. Безчастнов, А.М. Красильников, Т.М. Нэмени, Ю.А. Филиппов. М.: Энергопрогресс, 2001. 64 с.
3. Hewitson L., Brown M., Balakrishnan R. Practical power systems protection. Newnes, 2005. 289 p.
4. McCleer P.J. The Theory and Practice of Overcurrent Protection. Mechanical Products in Jackson, Mich., 1987. 233 p.
5. Paithankar Y.G., Bhide S.R. Fundamentals of Power System Protection. Prentice-Hall of India Pvt.Ltd 2004. 301 p.
6. Юндин М.А. Токовая защита электроустановок. СПб.: Изд-во «Лань», 2011. 288 с.
7. Гордов А.Н., Жагулло О.М., Иванова А.Г. Основы температурных измерений. М.: Энергоатомиздат, 1992. 303 с.
8. Zhi Gao. Sensorless stator winding temperature estimation for induction machines. Georgia Institute of Technology, 2006. 204 p.
9. Макаров А.В., Вечеркин М.В., Завьялов А.С. Обзор тепловых моделей асинхронных двигателей // Электротехнические системы и комплексы. 2013. № 21. С. 75-84.
10. Gao Zhi, Habetler T.G., Harley R.A. An Online Adaptive Stator Winding Temperature Estimator Based on a Hybrid Thermal Model for Induction Machines. IEEE International Conference on Electric Machines and Drives, 2005, pp. 754-761.
11. Zhang P., Du Y., Habetler T. G. A transfer function-based thermal model reduction study for induction machine thermal overload protective relays. IEEE Transactions on Industry Applications, 2009, vol. 46, Issue 5, pp. 1919-1926.

12. Бочкарев И.В., Ашмарин А.В. Устройство для измерения температуры обмотки электрической машины переменного тока под нагрузкой: а.с. 1108337 SU, МКИ G01K7/16, G01R27/08, заявл. 23.11.81; опубл. 15.08.84, Бюл. № 30.
13. Albla A.A.H., Brkovic B.M., Ječmenica M.M., Lazarevic Z.M. Online temperature monitoring of a grid connected induction motor. *Engineering*, 2017, p. 276-282.
14. Bochkarev I.V. Measuring the winding temperature of AC machines under load. *Russian Electric Engineering*. New York, Allerton Press, Inc. 1999, vol. 70, no. 2, pp. 28-32.
15. Бочкарев И.В., Ашмарин А.В. Устройство для измерения температуры обмотки электрической машины: а. с. 998873 SU, МКИ G01K7/16, заявл. 15.09.81; опубл. 23.02.83, Бюл. № 7.
16. Бочкарев И.В., Ашмарин А.В. Устройство для тепловой защиты электрической машины: а.с. SU № 1187234. МКИ H02H5/04, H02H7/08. Заявлено 23.04.83, опубл. 23.10.1985, Бюл. № 39.
17. Zhang P., Lu B., Habetler T.G. Active stator winding thermal protection for AC motors. *Conference Record of 2009 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference* 2009, pp. 11-19.
18. Zhang P. Active thermal protection for induction motors fed by motor control devices. *Georgia Institute of Technology*, 2010. 202 p.
19. Lee S.B., Habetler T.G. An On-line Stator Winding Resistance Estimation Technique for Temperature Monitoring of Line-connected Induction Machines. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2003, vol. 39, no. 3, pp. 685-694.
20. Aalabaf Sabaghi M., Feshki Farahani H., Hafezi H.R., Kiani P., Jalilian A. Stator winding resistance estimation for temperature monitoring of induction motor under unbalance supplying by DC injection method. *Engineering 2007, 42nd International Universities Power Engineering Conference* 2007, pp. 217-222.
21. Sabaghi M., Farahani H. F. Monitoring of induction motor temperature under unbalanced supplying by stator resistance estimation. *Indian Journal of Science and Technology*, 2012, vol. 5, no 3, pp. 2354-2359.
22. Enany T. A., Wahba W. I., Hassan M. A Remote and Sensorless Stator Winding Temperature Estimation Method for Thermal Protection for Induction Motor. *Engineering, Computer Science IJSDA*. 2014, vol. 3, pp. 53-72.
23. Zhang P., Lu B., Habetler T. G. A Remote and Sensorless Stator Winding Resistance Estimation Method for Thermal Protection of Soft-Starter-Connected Induction Machines. *Computer Science, Engineering. IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2008, vol. 55, no.10, pp. 3611-3618.
24. Zhang P., Du Y., Lu B., Habetler T. G. A DC Signal Injection-Based Thermal Protection Scheme for Soft-Starter-Connected Induction Motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2009, vol. 45, pp. 1351-1358.
25. Enany T.A., Hassan M., Othman E.S. Induction motor temperature monitoring via signal injection enhanced with adaptive neuro-fuzzy inference system. *Engineering*, 2017, pp. 91-109.
26. Zhang P., Lu B., Habetler T.G. An active stator temperature estimation technique for thermal protection of inverter-fed induction motors with considerations of impaired cooling detection. *IEEE International Electric Machines and Drives Conference*, 2009, 9 p.
27. Matic P.R., Gecic M. A., Lekić Đ., Marcetic D.P. Thermal Protection of Vector-Controlled IM Drive Based on DC Current Injection. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 2015, vol. 62, Issue 4, pp. 2082-2089.
28. Tshimanga T.P., Bezabih E., Iyer V.R., Zhang S., He L., Harley R.G. Stator temperature estimation of open-loop controlled induction machines via active DC voltage injection. *North American Power Symposium (NAPS)*, 2015.
29. Baneira F., Asiminoaei L., Doval-Gandoy J., Delpino H.A.M., Yepes A. G. G., Godbersen J. Estimation Method of Stator Winding Resistance for Induction Motor Drives Based on DC-Signal Injection Suitable for Low Inertia. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2019, vol. 34, pp. 5646-5654.
30. Yoo J., Lee J.-H., Sul S.-K., Baloch N. A. Stator Resistance Estimation Using DC Injection With Reduced Torque Ripple in Induction Motor Sensorless Drives. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2020.
31. Контроль температуры обмоток и защита от перегрева электрических машин переменного тока / И.В. Брякин, И.В. Бочкарев, Х.Г. Багиев, К.К. Келебаев. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2019. Т. 19. №1. С. 75-84.
32. Брякин И.В., Бочкарев И.В., Келебаев К.К. Диагностика параметров электрических машин переменного тока // Электротехнические системы и комплексы. 2017. №4(37). С. 38-44.
33. Брякин И.В., Бочкарев И.В. Способ измерения составляющих полного сопротивления и устройство для его реализации: пат. RU 2691624. Опубл. 17.06.2019. Бюл. № 17.

Поступила в редакцию 10 июля 2020 г.

INFORMATION IN ENGLISH

DEVELOPMENT OF PROTECTION SYSTEMS AGAINST OVERHEATING OF AC ELECTRIC MOTORS

Igor V. Bochkarev

D.Sc. (Engineering), Professor, Department of Electromechanics, Power Engineering Faculty, Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov, Bishkek, the Kyrgyz Republic. E-mail: elmech@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9873-9203>

Ivan V. Bryakin

D.Sc. (Engineering), Senior Researcher, Chief of the Laboratory of information and measuring systems, Institute of Mechanical Engineering and Automation, National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic, Bishkek, the Kyrgyz Republic. E-mail: bivas2006@yandex.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7463-8072>

Vadim R. Khrumshin

D.Sc. (Engineering), Professor, Department of Industrial Electric Power Supply, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: hvrmgn@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0972-2803>

Aida R. Sandybaeva

Assistant Professor, Department of Electromechanics, Power Engineering Faculty, Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov, Bishkek, the Kyrgyz Republic. E-mail: aida.kgtu@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1097-0989>

The analysis of common methods and systems of thermal protection of electric motors is carried out. It is shown that the most promising of them are the methods based on monitoring the active resistance of the stator winding of an electric motor, the value of which is uniquely determined by its temperature. However, such methods require either the input of a constant measuring current, or the selection of the indicated parameters by an algorithmic way from the operating variables. A new method of thermal protection of AC electric motors is proposed. The method is based on the fact that a change in the active and / or reactive components of the impedance of the winding due to a change in its temperature causes a corresponding change in the angle between the vectors of phase voltages and currents. This provides thermal protection by controlling the change in the specified angle. The corresponding version of the structural block diagram of the device that implements the proposed method of thermal protection has been developed. Experimental studies have been carried out, the results of which have confirmed the efficiency and effectiveness of the proposed technical solution.

Keywords: AC motor, thermal model, soft start device, active resistance of the stator winding, synchronous detector, in-phase and quadrature components of the supply voltage, phase difference between voltage and current vectors.

REFERENCES

- Kisarimov R.A. *Elektroprivod: Spravochnik* [Electric drive: Handbook]. Moscow: RadioSoft, 2012. 352 p. (In Russian)
- Bezchastnov G.A., Krasilnikov A.M., Nemeny T.M., Filipov Yu.A. *Kontrol sostoyaniya izolyatsii elektricheskikh mashin v ekspluatatsii* [Insulation monitoring of electrical machines in operation]. Moscow: Energoprogress, 2001. 64 p. (In Russian)
- Hewitson L., Brown M., Balakrishnan R. Practical power systems protection. Newnes, 2005. 289 p.
- McCleer P.J. The Theory and Practice of Overcurrent Protection. Mechanical Products in Jackson, Mich. 1987. 233 p.
- Paithankar Y. G., Bhide S. R. Fundamentals of Power System Protection. Prentice-Hall of India Pvt. Ltd 2004. 301 p.
- Yundin M.A. *Tokovaya zashchita elektroustanovok* [Current protection of electrical installations]. St. Petersburg: Publishing house "Lan", 2011. 288 p. (In Russian)
- Gordov A.N., Zhagullo O.M., Ivanova A.G. *Osnovy temperaturnykh izmereniy* [Basics of temperature measurements]. Moscow: Energoatomizdat, 1992. 303 p. (In Russian)
- Zhi Gao. Sensorless stator winding temperature estimation for induction machines. Georgia Institute of Technology. 2006. 204 p.
- Makarov A.V., Vecherkin M.V., Zavyalov A.S. Review of thermal models of induction motors. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical systems and complexes], 2013, no. 21, pp. 75-84. (In Russian)
- Gao Zhi, Habetler T. G., Harley R. A. An Online Adaptive Stator Winding Temperature Estimator Based on a Hybrid Thermal Model for Induction Machines. IEEE International Conference on Electric Machines and Drives, 2005, pp. 754-761.
- Zhang P., Du Y., Habetler T. G. A transfer function-based thermal model reduction study for induction machine thermal overload protective relays. IEEE Transactions on Industry Applications, 2009, vol. 46, Issue 5, pp. 1919-1926.
- Bochkarev I.V., Ashmarin A.V. A device for measuring the temperature of the winding of an alternating current electric machine under load. 1108337 SU, MKI G01K7 / 16, G01R27 / 08, app. 11/23/81; publ. 08/15/84, Bul. No. 30. (In Russian)
- Albla A. A. H., Brkovic B. M., Ječmenica M. M., Lazarevic Z. M. Online temperature monitoring of a grid connected induction motor. Engineering, 2017, p. 276-282.
- Bochkarev I.V. Measuring the winding temperature of AC machines under load. Russian Electric Engineering. New York, Allerton Press, Inc. 1999, vol. 70, no. 2, pp. 28-32.
- Bochkarev I.V., Ashmarin A.V. Device for measuring the temperature of the winding of an electric machine / A. s. 998873 SU, MKI G01K7 / 16, app. 09/15/81; publ. 02/23/83, Bul. No. 7. (In Russian)
- Bochkarev I.V., Ashmarin A.V. Device for thermal protection of an electrical machine / A.S. SU No. 1187234. MKI H02H5 / 04, H02H7 / 08. Stated 04/23/83, published 10/23/1985, Bul. No. 39. (In Russian)
- Zhang P., Lu B., Habetler T. G. Active stator winding thermal protection for AC motors. Conference Record of 2009 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference 2009, pp. 11-19.
- Zhang P. Active thermal protection for induction motors fed by motor control devices. Georgia Institute of Technology, 2010. 202 p.
- Lee S.B., Habetler T.G. An On-line Stator Winding Resistance Estimation Technique for Temperature Monitoring of Line-connected Induction Machines. IEEE Transactions on Industry Applications, 2003, vol. 39, no. 3, pp. 685-694.
- AalabafSabaghi M., Feshki Farahani H., Hafezi H.R., Kiani P., Jalilian A. Stator winding resistance estimation for temperature monitoring of induction motor under unbalance supplying by DC injection method. Engineering 2007, 42nd International Universities Power Engineering Conference 2007, pp. 217-222.
- Sabaghi M., Farahani H. F. Monitoring of induction motor temperature under unbalanced supplying by stator resistance estimation. Indian Journal of Science and Technology, 2012, vol. 5, no 3, pp. 2354-2359.
- Enany T.A., Wahba W.I., Hassan M. A Remote and Sensorless Stator Winding Temperature Estimation Method for Thermal Protection for Induction Motor. Engineering, Computer Science IJSDA. 2014, vol. 3, pp. 53-72.
- Zhang P., Lu B., Habetler T. G. A Remote and Sensorless Stator Winding Resistance Estimation Method for Thermal Protection of Soft-Starter-Connected Induction Machines. Computer Science, Engineering. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, vol. 55, no.10, pp. 3611-3618.
- Zhang P., Du Y., Lu B., Habetler T. G. A DC Signal Injection-Based Thermal Protection Scheme for Soft-Starter-Connected Induction Motors. IEEE Transactions on Industry Applications, 2009, vol. 45, pp. 1351-1358.
- Enany T. A., Hassan M., Othman E. S. Induction motor temperature monitoring via signal injection enhanced with adaptive neuro-fuzzy inference system. Engineering, 2017, pp. 91-109.
- Zhang P., Lu B., Habetler T. G. An active stator temperature estimation technique for thermal protection of in-verter-fed induction motors with considerations of impaired cooling detection. IEEE International Electric Machines and Drives Conference, 2009, 9 p.
- Matic P. R., Gecic M. A., Lekić Đ., Marcetic D. P. Thermal Protection of Vector-Controlled IM Drive Based on DC Current Injection. IEEE Transactions on Industrial Electronics 2015, vol. 62, Issue 4, pp. 2082-2089.
- Tshimanga T. P., Bezabih E., Iyer V. R., Zhang S., He L., Harley R. G. Stator temperature estimation of open-loop

- controlled induction machines via active DC voltage injection. North American Power Symposium (NAPS), 2015.
29. Baneira F., Asiminoaei L., Doval-Gandoy J., Delpino H.A.M., Yepes A. G. G., Godbersen J. Estimation Method of Stator Winding Resistance for Induction Motor Drives Based on DC-Signal Injection Suitable for Low Inertia. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, vol. 34, pp. 5646-5654.
 30. Yoo J., Lee J.-H., Sul S.-K., Baloch N. A. Stator Resistance Estimation Using DC Injection With Reduced Torque Ripple in Induction Motor Sensorless Drives. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020.
 31. Bryakin I.V., Bochkarev I.V., Bagiev Kh.G., Kelebaev K.K. Temperature control of windings and protection against overheating of AC electric machines. *Vestnik YuUrGU. Seriya «Energetika»* [Bulletin of SUSU. Series "Energy"], 2019, vol. 19, no. 1, pp. 75–84. (In Russian)
 32. Bryakin I.V., Bochkarev I.V., Kelebaev K.K. Diagnostics of the parameters of AC electrical machines. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrical systems and complexes], 2017, no. 4 (37), pp. 38-44. (In Russian)
 33. Bryakin I.V., Bochkarev I.V. *Sposob izmereniya sostavlyayushchikh polnogo soprotivleniya i ustroystvo dlya ego realizatsii* [Method for measuring impedance components and a device for its implementation]. Patent RU, no. 2691624. 2019.

Разработка систем защиты от перегрева электродвигателей переменного тока / И.В. Бочкарев, И.В. Брякин, В.Р. Храмшин, А.Р. Сандыбаева // Электротехнические системы и комплексы. 2020. № 3(48). С. 41-51. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-3\(48\)-41-51](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-3(48)-41-51)

Bochkarev I.V., Bryakin I.V., Khrumshin V.R., Sandybaeva A.R. Development of Protection Systems Against Overheating of AC Electric Motors. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2020, no. 3(48), pp. 41-51. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-3\(48\)-41-51](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-3(48)-41-51)