

УДК 536.55: 621.3.045.5

И. В. Бочкарев¹, И. В. Брякин², А. Р. Сандыбаева¹, А. И. Абдуваитов¹

¹Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова

²Институт машиноведения, автоматики и геомеханики НАН КР

КОНТРОЛЬ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ ОБМОТОК ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Показаны основные причины нагрева обмоток электрооборудования, выполнен обзор и анализ способов и устройств контроля температуры обмоток, питаемых переменным током. Описан разработанный новый способ контроля температуры обмоток, согласно которому в качестве физической величины, характеризующей величину нагрева обмотки, предложено использовать разность фаз между векторами напряжения и тока, которая зависит от величин активного и индуктивного сопротивлений обмотки. Приведена функциональная схема, поясняющая принцип работы нового способа теплового контроля обмоток, приведено описание всех измерительных процедур, выполняемых при контроле, и их аналитическое обоснование. Показано, что предложенный способ контроля обеспечивает повышение точности контроля нагрева обмотки непосредственно во время работы без вывода электрооборудования из эксплуатации. Экспериментальная проверка разработанной системы контроля теплового контроля, выполненная с использованием асинхронного электродвигателя, показала эффективность и достаточно высокую точность измерения температуры, которая составила $\pm 1^{\circ}\text{C}$ в диапазоне температур от 50°C до 130°C .

Ключевые слова: способы теплового контроля обмоток, термодатчик, активное и реактивное сопротивление обмотки, разность фаз между векторами напряжения и тока, синфазное и квадратурное синхронное детектирование, трансформированная векторная диаграмма напряжений.

Введение

В процессе эксплуатации любое электрооборудование (ЭО) нагревается. Это объясняется тем, что процесс преобразования энергии при работе не идеален и сопровождается возникновением потерь различной физической природы – электрических, магнитных, механических, которые рассеиваются в виде тепла. Таким образом, тепловыделение является в ЭО вторичным процессом, обычно нежелательным с точки зрения назначения ЭО (за исключением различных электронагревателей), но неизбежным по своей сути [1]. Нагреваются практически все элементы и узлы ЭО, но наиболее уязвимым элементом являются его обмотки, а точнее, изоляция обмоток, которая при увеличении нагрева теряет свои диэлектрические свойства за счет интенсивного снижения ее электрической и механической прочности, что может привести к пробое изоляции, короткому замыканию и, в конце концов, к полному выходу ЭО из строя. Поэтому при работе ЭО необходим постоянный оперативный контроль нагрева обмоток.

Следует отметить, что на величину нагрева оказывают влияние несколько факторов, основными из которых являются следующие [2]:

- условия пуска (величина пускового тока, длительность и частота пусков и т.д.);
- величина рабочего тока обмотки, которая, в свою очередь, зависит от величины нагрузки ЭО;
- плохие электрические контактные соединения в обмотке;
- условия охлаждения ЭО (эффективность системы охлаждения);
- состояние окружающей среды.

При этом соответственно контроль температуры непосредственно во время эксплуатации позволяет по величине нагрева оценить, например, наличие перегрузок, правильность эксплуатации ЭО, состояние и корректность работы его системы охлаждения, выявить дефекты в изоляции и тем самым предупредить аварийные ситуации. Таким образом, мониторинг теплового состояния оборудования позволяет повысить эффективность и надежность его эксплуатации, а также дает информацию для целенаправленного ремонта или замены оборудования в аварийном состоянии. Поэтому оперативный контроль теплового

состояния ЭО с использованием передовых методов контроля температуры [3-5] является очень важной и актуальной задачей.

Краткий обзор способов и устройств контроля температуры обмоток ЭО

В общем случае любая система измерения и контроля температуры содержит два основных функциональных блока:

1) первичный измерительный преобразователь (ПИП) в виде термодатчика, который с помощью определённого физического эффекта преобразует температуру (входная величина) в пропорциональный ей выходной информационный сигнал;

2) вторичный измерительный преобразователь (ВИП), который обрабатывает и преобразует информационный сигнал в форму, пригодную для регистрации текущей величины температуры, которая может быть использована системами анализа и управления.

Кроме того, система контроля может содержать компаратор с датчиком уровня допустимого сигнала, блоки индикации и систему коммутации.

Функциональная структура системы контроля температуры обмотки показана на рисунке 1.

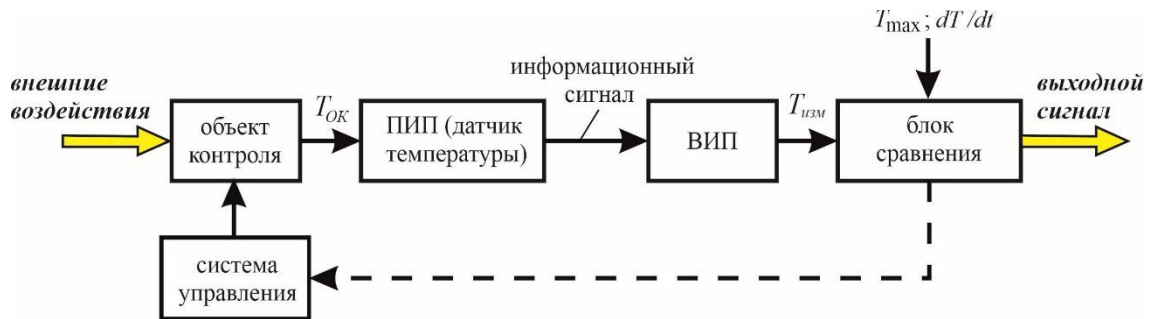


Рисунок 1 – Функциональная структура системы контроля температуры

Фактическая температура обмотки объекта контроля $T_{обм}$ изменяется под воздействием внешних воздействий, например, при изменении нагрузки контролируемого электрооборудования. Температура $T_{обм}$ воздействует на термодатчик, выполняющий функции ПИП, который преобразует ее в выходной информационный сигнал. Этот сигнал в ВИП преобразуется в измерительный сигнал $T_{изм}$, численное значение которого характеризует $T_{обм}$. В состав ВИП обычно входит усилитель. Контроль нагрева обычно проводят с целью недопущения перегрева обмоток. Для этого в блоке сравнения величина фактической текущей температуры обмотки сравнивается с максимально допустимым нагревом T_{max} . Кроме того, при необходимости в этом блоке оценивается также скорость нарастания температуры, например, в виде зависимости T/dt . Этот параметр косвенно характеризует целый ряд эксплуатационных особенностей. Например, если объектом контроля является электрическая машина, то повышенная скорость нарастания температуры может характеризовать условия пуска (в частности, если пусковой момент меньше момента нагрузки на валу), резкое нештатное увеличение нагрузки, некорректную работу системы вентиляции (в частности, загрязнение вентиляционных каналов, отсутствие вентилятора) и т.д. Если контролируемые параметры превышают допустимые пределы, то по сигналу с блока сравнения система управления сформирует соответствующие управляющие сигналы, посредством которых будут выполнены определенные воздействия на ЭО, например, отключение от питания, снижение его нагрузки или другие действия в зависимости от заранее заданного алгоритма.

Очевидно, что точность системы контроля температуры определяется в первую очередь измерительными возможностями ПИП, поскольку именно его выходной сигнал обрабатывается в ВИП и является основой точности выходного сигнала.

Известно, что непосредственно измерить температуру невозможно, поскольку в настоящее время не существует эталона единицы этой величины. Этим температура отличается от других физических величин, поскольку, например, при измерении длины существует эталонный метр, при измерении массы – эталонный килограмм и т.д. В связи с этим вся термометрия базируется на том, что определение температуры вещества производят посредством контроля за изменением его свойств другой физической природы, которые изменяются при изменении температуры. Многообразие этих свойств определяет многообразие способов и устройств измерения температуры, в основу которых положены различные физические явления (табл. 1).

Таблица 1 – Физические явления, используемые при измерении температуры, и соответствующие им термодатчики

№	Физическое явление, используемое при измерении температуры	Тип термодатчика
1	Объемное расширение	Жидкостные термометры [6]
2	Линейное расширение	Лазерные или контактные дилатометры с датчиками изменения длины [7, 8]
3	Изменение давления в замкнутом объеме	Газовые, жидкостные или конденсаторные манометрические термометры [9]
4	Терморезистивный эффект (изменение электрического сопротивления)	Металлические термометры сопротивления, термопреобразователи сопротивления, терморезисторы [10]
5	Термоэлектрический эффект (эффект Зеебека)	Термопары [11]
6	Тепловая зависимость контактной разности потенциалов в полупроводниковом p-n-переходе	Полупроводниковые датчики температуры [12]
7	Зависимость частоты механического резонанса кристалла от температуры	Кварцевые термометры [13, 14]
8	Интенсивность теплового излучения	Пирометры, тепловизоры [15-17]
9	Выделение летучих веществ неметаллическими материалами при их перегреве	Газоанализаторы [18]

Очевидно, что не все из перечисленных способов измерения температуры удобны для использования в автоматизированных системах термоконтроля ЭО. В первую очередь это относится к способам 1, 2, 3, 8, 9. Наиболее приемлемыми способами являются такие, в которых температура преобразуется в выходной электрический сигнал, который легко обрабатывать, передавать на расстояние и использовать в качестве не только информационных, но и управляющих сигналов.

Следует отметить, что в системах теплового контроля в основном применяют первичные преобразователи параметрического типа, но могут использоваться и генераторного типа, например, термопары.

В связи с огромным значением контроля температуры к настоящему времени разработано большое количество различных способов и устройств контроля температуры обмоток ЭО. Все способы можно разделить на два больших класса:

- способы косвенного контроля температуры, при которых в качестве первичного измерительного преобразователя (термодатчика) используют специальные контактные измерительные устройства;
- способы непосредственного измерения температуры, при которых в качестве термодатчика используют непосредственно сам объект контроля, т.е. обмотку ЭО.

Способы контроля первого класса предусматривают в первую очередь использование различных датчиков температуры, непосредственно контактирующих с обмоткой, температура которой подлежит измерению [19]. В качестве таких датчиков используют различные термометры расширения или термодатчики (термопары, биметаллические датчики, терморезисторы, термисторы, кварцевые термометры и т.п.). Однако очевидно, что

такие датчики осуществляют контроль температуры только того локального места, где они непосредственно установлены. Более того, обычно они требуют установку в зону контроля еще на стадии изготовления ЭО и зачастую не могут быть использованы для оборудования, уже находящегося в эксплуатации.

Как показал проведенный анализ технической литературы, одним из наиболее эффективных для теплового контроля обмоток ЭО являются способы второго класса, реализующие терморезистивный эффект при изменении температуры обмотки. В сущности, данные способы контроля температуры обмотки основаны на том, что любая обмотка может рассматриваться как интегрирующий термометр сопротивления. Это объясняется тем, что материал провода обмотки имеет положительный температурный коэффициент сопротивления, и, таким образом, температура обмотки имеет соответствующую функциональную зависимость от ее активного сопротивления. В этом случае перегрев обмотки $\Delta T_{обм}$ вычисляется по формуле

$$\Delta T_{обм} = [(r_{Г} - r_{Х}) / r_{1Х}] \cdot (K + T_{Х}) + T_{Х} - T_{Г} = T_{обм} - T_{Г}, \quad (1)$$

где $r_{Х}$ и $r_{Г}$ – активное сопротивление обмотки соответственно в холодном состоянии при известной температуре $T_{Х}$ и в нагретом состоянии при температуре окружающей среды $T_{Г}$; K – температурный коэффициент сопротивления материала обмотки.

Видно, что для расчета фактической температуры обмотки необходимо измерить ее текущее сопротивление. Измерение активного сопротивления обмотки выполняют методом амперметра-вольтметра. Однако в цепях переменного тока это сделать достаточно сложно, поскольку наряду с активным сопротивлением обмотка обладает также индуктивным сопротивлением. На практике обычно обмотку отключают от питания и подключают к источнику постоянного тока. Затем измеряют ток, протекающий по обмотке $I_{обм}$, и падение напряжения на обмотке $U_{обм}$ и вычисляют ее сопротивление по закону Ома:

$$r_{обм} = U_{обм} / I_{обм}. \quad (2)$$

При этом для учета остывания ЭО в промежутке после его отключения и до начала измерений выполняют экстраполяцию кривой остывания. Для этого производят несколько измерений сопротивления, строят график изменения сопротивления при остывании и продолжают эту кривую влево, сохраняя характер ее изменения, до пересечения с осью абсцисс в точке $R_{Г}$, которая с достаточной точностью определяет искомое сопротивление обмотки в горячем состоянии (рис. 2).

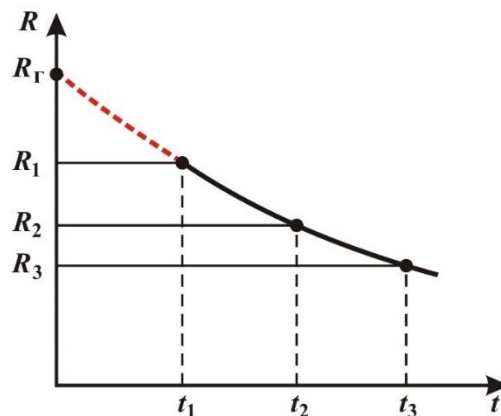


Рисунок 2 – Кривая остывания обмотки после отключения питания

Однако такой способ контроля не позволяет осуществлять контроль нагрева обмотки непосредственно в процессе работы, поскольку требует вывода ЭО из эксплуатации, что приводит к остановке всего рабочего процесса. Поэтому разработан ряд способов, позволяющих использовать описанный процесс без отключения питания. В известных измерительных системах это обеспечивается путем ввода в рабочий переменный ток обмотки небольшого постоянного измерительного тока с последующим измерением двух

параметров – величины этого тока и падения напряжения от него на обмотке. Ввод постоянного измерительного тока можно осуществлять двумя способами:

- при помощи дополнительного источника постоянного тока [20, 21];
- путем формирования его непосредственно из рабочего переменного тока обмотки.

Второй способ реализуют различными методами:

- путем включения в цепь обмотки узла с двусторонней проводимостью с различными величинами сопротивлений для разных полувольт [20, 22];
- путем введения нелинейности в инвертор АД с векторным управлением [23];
- задержкой угла открывания тиристорov в устройстве плавного пуска [24].

Однако введение постоянного тока в цепь питания ЭО переменного тока требует применения специальных аппаратных средств, включенных последовательно с обмоткой статора. Это усложняет практическую реализацию данного способа тепловой защиты и снижает надежность и точность защиты. Кроме того, введение постоянной составляющей в рабочий переменный ток изменяет режим работы и условия нагрева ЭО, что ухудшает качество функционирования и эксплуатационные показатели, например, в электрических машинах возникают пульсации крутящего момента.

Другой подход предложен в [25, 26], где для исключения необходимости в постоянном измерительном токе расчет $r_{обм}$ выполнять путем выделения соответствующих компонентов из фазных напряжений и токов, для чего в качестве датчика тока предлагается использовать измерительный шунт, последовательно включенный в цепь ЭО. Посредством этого датчиком тока регистрируют электрический сигнал в виде напряжения на измерительном шунте, содержащий информацию о параметрах электрического тока в обмотке. Кроме того, регистрируют напряжение питания и падение напряжения на обмотке. Затем в первом информационном канале осуществляют амплитудное детектирование этого электрического сигнала и с использованием величины сопротивления измерительного шунта формируют первый информационный сигнал в виде величины электрического тока в обмотке, а во втором информационном канале осуществляют фазовое детектирование напряжения на измерительном шунте и амплитудное детектирование напряжения на обмотке. Перемножая полученные сигналы, формируют тем второй информационный сигнал в виде величины вещественной составляющей падения напряжения на обмотке. По величине отношения величин второго и первого информационных сигналов, пропорциональных текущей величине активной составляющей импеданса обмотки, алгоритмическим путем вычисляют температуру обмотки. Таким образом, описанные способы контроля температуры обмотки требуют применения измерительного шунта, что в значительной степени усложняет практическую реализацию такого подхода к контролю температуры, приводит к нарушению режима работы электрической машины и дополнительным потерям мощности в измерительном шунте. Все это снижает надежность работы всей системы в целом.

Подытоживая, можно констатировать, что задача создания системы достоверного теплового контроля ЭО переменного тока с минимальным влиянием на работу ЭО остается нерешенной.

Результаты исследования и их обсуждение

Для ликвидации описанных недостатков известных подходов к построению систем контроля температуры обмоток ЭО переменного тока был разработан новый способ, согласно которому в качестве физической величины, характеризующей величину нагрева обмотки, используют разность фаз между векторами напряжения и тока. Эта разность фаз зависит от величин активной r и реактивной x составляющих импеданса обмотки, численные значения которых, в свою очередь, однозначно определяются величиной нагрева этой обмотки. Таким образом, величина выходного диагностического сигнала является функцией температуры обмотки, что позволяет обеспечить постоянный оперативный контроль

теплового состояния обмотки ЭО непосредственно в рабочем режиме без отключения питания для выполнения диагностических процедур.

Блок-схема функциональной реализации, поясняющая принцип работы нового способа теплового контроля обмоток ЭО переменного тока, приведена на рисунке 3, где обозначено:

\dot{U} и $\dot{U}_{ТТ}$ – напряжение питания электрической цепи обмотки и выходное напряжение измерительного трансформатора тока соответственно;

U_{Im} – первый информационный сигнал в виде мнимой составляющей напряжения питания электрической цепи обмотки, пропорциональный мнимой составляющей X импеданса обмотки;

U_{Re} – второй информационный сигнал в виде действительной составляющей напряжения питания электрической цепи обмотки, пропорциональный вещественной составляющей R импеданса обмотки;

$U_{Im} / U_{Re} = x / r$ – диагностический сигнал в виде отношения величин первого и второго информационных сигналов.

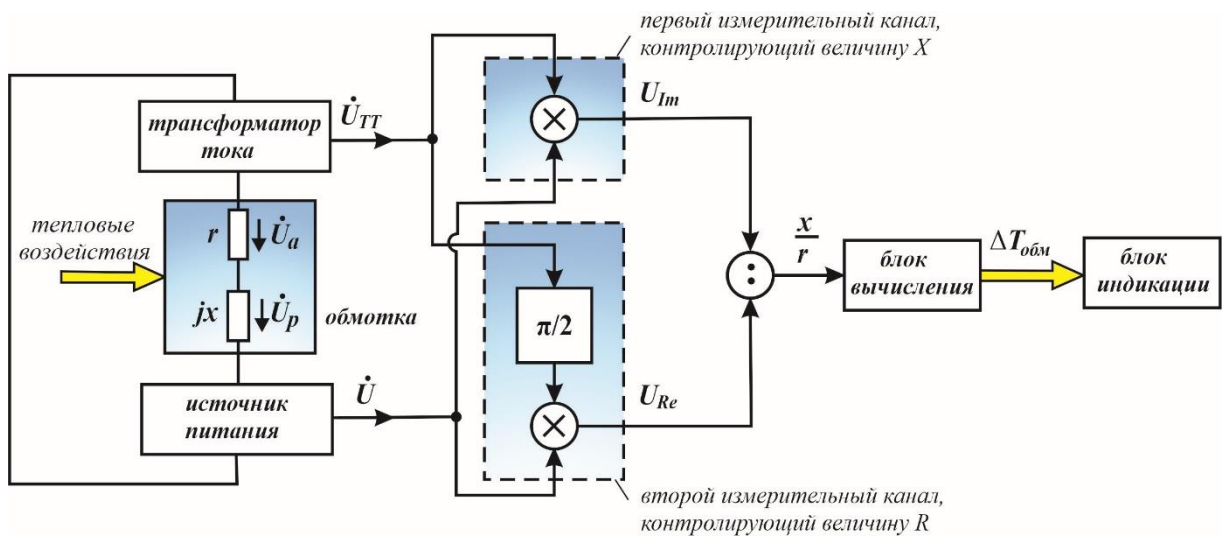


Рисунок 3 – Блок-схема функциональной реализации нового способа контроля нагрева обмотки ЭО переменного тока

Реализация предложенного способа осуществляется следующим образом. Переменное питающее напряжение \dot{U} подается на обмотку, последовательно которой подключен датчика тока в виде измерительного трансформатора тока, при помощи которого регистрируют электрический сигнал $\dot{U}_{ТТ}$, содержащий информацию о параметрах электрического тока в цепи обмотки.

Контроль температуры обмотки осуществляется посредством выполнения следующих процедур:

1) в первом измерительном канале выполняют процедуру определения первого информационного сигнала в виде мнимой составляющей U_{Im} напряжения питания электрической цепи обмотки. Указанную процедуру осуществляют путем перемножения напряжения питания \dot{U} электрической цепи обмотки с электрическим сигналом датчика тока $\dot{U}_{ТТ}$. Таким образом, выполняют синфазное синхронное детектирование и получают первый сигнал, пропорциональный мнимой составляющей X импеданса обмотки.

2) во втором измерительном канале выполняют процедуру определения второго информационного сигнала в виде вещественной составляющей U_{Re} напряжения питания электрической цепи обмотки. Для этого осуществляют фазовый сдвиг напряжения $\dot{U}_{ТТ}$ на

$\pi/2$ относительно его исходного фазового состояния и перемножают напряжение питания \dot{U} электрической цепи обмотки с полученным преобразованным сигналом, т.е. выполняют квадратурное синхронное детектирование и получают второй сигнал, пропорциональный вещественной составляющей R импеданса обмотки.

3) формируют диагностический сигнал в виде отношения величин первого U_{Im} и второго U_{Re} информационных сигналов, получая при этом сигнал, пропорциональный отношению x/r .

4) полученное значение диагностического сигнала, пропорционального x/r , обрабатывают алгоритмическим путем в блоке вычисления и получают величину перегрева обмотки $\Delta T_{обм}$. Этот результат выводят в блок индикации.

Выполним теоретическое обоснование сущности предлагаемого нового способа теплового контроля обмотки ЭО переменного тока.

Измеряя напряжение питания обмотки и ток в ее цепи, можно определить ее импеданс, 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 обмотки; $x = \omega \cdot L$ – реактивная составляющая импеданса обмотки; ω – циклическая частота напряжения питания обмотки; $L = F(\mu, \{Q_i\})$ – индуктивность обмотки; μ – магнитная проницаемость материала обмотки; $\{Q_i\}$ – набор конструктивных параметров обмотки и самого ЭО.

Для анализа особенностей физических процессов, происходящих в рассматриваемой электрической цепи построим соответствующую векторную диаграмму напряжений на комплексной плоскости (рис.4).

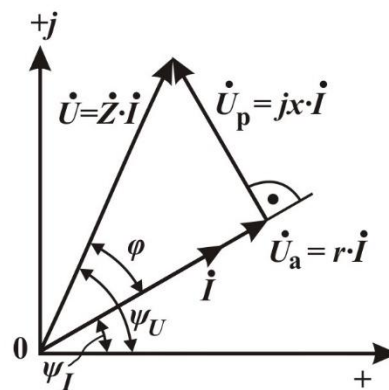


Рисунок 4 – Векторная диаграмма напряжений

В соответствии с (3) и рисунком 5 можем записать следующее уравнение цепи:

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

где $\dot{U}_a = \dot{I} \cdot r$ и $\dot{U}_p = j \cdot \dot{I} \cdot x$ – напряжение на активном и на реактивном сопротивлениях обмотки.

Для удобства дальнейших рассуждений и наглядности полученных результатов совместим вектор тока электрической цепи с вещественной осью координат на комплексной плоскости (рис. 5).

Из анализа выражения (4) и рисунка 5 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) $\dot{U}_c = \dot{U}_{Re}$ и квадратурную (мнимую) $\dot{U}_k = \dot{U}_{Im}$ составляющие:

$$\dot{U} = U \cdot \cos\varphi + j \cdot U \cdot \sin\varphi = U_{Re} + j \cdot U_{Im} = I \cdot r + j \cdot I \cdot x. \quad (5)$$

При этом $U_a = U_{Re}$; $U_p = j \cdot U_{Im}$.

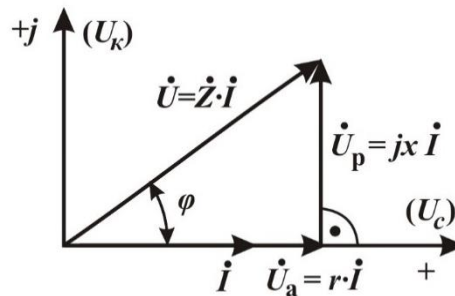


Рисунок 5 – Трансформированная векторная диаграмма напряжений

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

Иными словами, между углом φ и температурой $T_{обм}$ обмотки существует явная функциональная зависимость, определяемая соотношением между x и r :

$$\varphi = \arctg \frac{U_{Im}}{U_{Re}} = \arctg \frac{x}{r} = F(T_{обм}). \quad (6)$$

При изменении температуры $T_{обм}$ конец вектора \dot{U} будет перемещаться на комплексной плоскости по окружности радиуса $R = U = \text{const}$ с центром в точке 0 и занимать положение, соответствующее отношению $U_p / U_a = U_{Im} / U_{Re}$.

Из выражений (5) и (6) видно, что для решения поставленной задачи, т.е. для контроля температуры обмотки, достаточно регистрировать состояние разности фаз φ между векторами \dot{U} и \dot{I} . Используя синхронизацию обработки сигналов по фазе тока в неразветвленной цепи, можно аппаратными средствами регистрировать действующие значения квадратурной U_{Im} и синфазной U_{Re} составляющих напряжения питания \dot{U} , а значит, и определить текущее значение $\varphi_i = F(T_{обм.i})$. Фактически речь идет о возможности реализации нового фазового метода контроля температуры обмотки ЭО переменного тока.

Для осуществления рассматриваемого метода контроля температуры обмотки предлагается соответствующий вариант структурной блок-схемы устройства, в котором также реализуется функция тепловой защиты ЭО (рис. 6).

На рисунке 6 обозначено: 1 – источник питания обмотки ЭО; 2 – обмотка ЭО, используемая в качестве термодатчика; 3 – исполнительный элемент (устройство коммутации ЭО); 4 – датчик тока в виде измерительного трансформатора тока (ИТТ); 5 – преобразователь тока в напряжение; 6 – аттенюатор-регистратор; 7 – фазовращатель; – формирователь квадратурных опорных напряжений; 8 и 9 – синхронные детекторы соответственно синфазной и квадратурной составляющих напряжения питания ЭО; 10 – блок вычисления с цифровым выходом; 11 – цифровой блок сравнения; 12 – блок задания допустимых тепловых параметров; 13 – формирователь управляющего сигнала.

В полученных выражениях ψ_0 является фазой опорных напряжений, синхронизированной с фазой ψ_l тока электрической цепи.

Для координат трансформированной комплексной плоскости можем записать:

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

Фактически синхронные детекторы 8 и 9 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 $u = U_m \cdot \sin(\omega t + \varphi)$ до уровня $u^* = K_M \cdot U_m \cdot \sin(\omega t + \varphi)$, которое затем подается на информационные входы синхронных детекторов 8 и 9, где и происходит его необходимое преобразование, в результате которого на выходе синхронных детекторов 8 и 9 получаем следующие соответствующие сигналы:

$$U_{Im} = K_{КД} \cdot K_M \cdot U_m \cdot \sin(\psi_0 - \varphi),$$

$$U_{Re} = K_{СД} \cdot K_M \cdot U_m \cdot \cos(\psi_0 - \varphi);$$

где U_{Im} и U_{Re} – соответственно квадратурная и синфазная составляющие напряжения питания; $K_{КД}$ и $K_{СД}$ – коэффициенты преобразования соответственно квадратурного синхронного детектора 8 и синфазного синхронного детектора 9; K_M – коэффициент масштабирования блока 6.

Таким образом, блоки 5 и 9 образуют первый измерительный канал с выходным сигналом U_{Im} , а совокупность блоков 6, 7, 8 – второй измерительный канал с выходным сигналом U_{Re} ,

Блоком 10 осуществляется преобразование входных сигналов U_{Im} и U_{Re} путем вычислительной процедуры в соответствии с выражением:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{x}{r} = \frac{U_{Im}}{U_{Re}}. \quad (12)$$

Для существенного упрощения процедуры вычисления температуры обмотки примем во внимание, что на индуктивные сопротивления обмоток температура их нагрева в реально возможном для ЭО диапазоне практически не влияет [27]. Исходя из этого, с достаточной для практических расчетов точностью можно принять $x_X = x_\Gamma = x = \text{const}$. Тогда из (10) для активного сопротивления обмотки соответственно в холодном и горячем состояниях можно записать

$$r_X = x \frac{U_{\operatorname{Re}(X)}}{U_{\operatorname{Im}(X)}} = \frac{x}{\operatorname{tg} \varphi_X}; \quad r_\Gamma = x \frac{U_{\operatorname{Re}(\Gamma)}}{U_{\operatorname{Im}(\Gamma)}} = \frac{x}{\operatorname{tg} \varphi_\Gamma}. \quad (13)$$

Учтем, что для теплового контроля обмотки наиболее целесообразно использовать величину ее перегрева $\Delta T_{обм}$ (см. выражение (1), поскольку именно этот параметр показывает, как изменяется тепловое состояние обмотки вследствие текущих условий ее работы и охлаждения и при этом на результаты контроля не оказывает влияния изменение температуры окружающей среды, величина которой определяется исключительно внешними факторами и не зависит от изменения температуры обмотки. Однако очевидно, что при построении системы тепловой защиты необходимо учитывать не перегрев, а полный нагрев обмотки $T_{обм}$, который определяется совокупностью как внутренних, так и внешних факторов.

С учетом сказанного, а также выражений (1) и (13), получим

$$T_{обм}(t) = \left(\frac{\operatorname{tg} \varphi_X}{\operatorname{tg} \varphi_\Gamma} - 1 \right) \cdot (K + T_X) + T_x; \quad (14)$$

$$T_{обм}(t) = \left(\frac{U_{Im(X)}}{U_{Re(X)}} \cdot \frac{U_{Re(\Gamma)}}{U_{Im(\Gamma)}} - 1 \right) \cdot (K + T_x) + T_x. \quad (15)$$

В этих выражениях индексы «X» и «Г» относятся к соответствующим параметрам, полученным при холодном и горячем состояниях обмотки.

Таким образом, на выходе блока 10 получаем сигнал, пропорциональный временному изменению температуры обмотки $T_{обм}$. Таким образом, блок 10 вычисляет как текущую температуру обмотки, так и интенсивность ее изменения.

Полученный сигнал в блоке сравнения 11 сравнивается с допустимыми значениями тепловых параметров, например, с $T_{дон}$, заранее введенными в блок 12, и в том случае, если перегрев обмотки превышает допустимое значение, т.е. при $T_{обм} \geq T_{дон}$, то на выходе блока 12 появляется соответствующий сигнал. Этот сигнал поступает в блок 13, который формирует управляющий сигнал на отключение ЭО от питания. Это обеспечивает тепловую защиту ЭО и предотвращает потенциально аварийную ситуацию.

Экспериментальная проверка эффективности разработанной системы теплового контроля

Для оценки работоспособности и эффективности предложенного устройства теплового контроля обмоток ЭО переменного тока проведем экспериментальную проверку точности, с которой данное устройство обеспечивает измерение температуры обмотки.

Принципиальная схема включения основных функциональных элементов процесса испытаний представлена на рисунке 7, где УКТ – устройство контроля температуры, реализующее новый способ контроля нагрева обмотки электродвигателя переменного тока; ИИС – информационно-измерительная система, ориентированная на исследование нового способа теплового контроля; Т – термодатчик; АД – асинхронный двигатель.

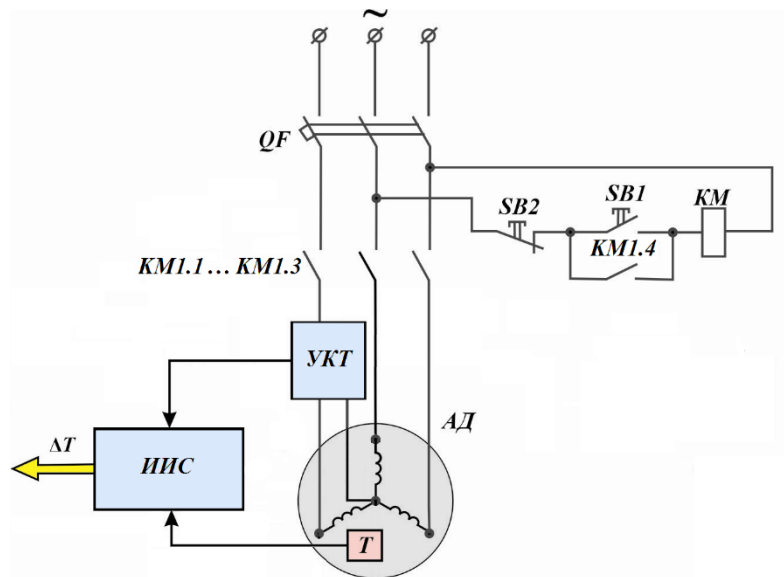


Рисунок 7 – Принципиальная схема включения основных функциональных элементов процесса испытаний

В качестве объекта контроля выбран АД типа 4А71А6У3 мощностью 0,37 кВт, в лобовую часть обмотки статора встроен термодатчик Т, который осуществлял измерение ее температуры. Вследствие того, что электродвигатель имеет небольшие размеры, то разница температур разных частей обмотки, например, пазовой и лобовой частей, минимальна. Это позволяет с высокой степенью точности считать, что измеренная термодатчиком температура является фактической средней температурой обмотки. Разработанное устройство контроля температуры подключено к одной из фаз электродвигателя.

Для проверки состоятельности предлагаемого способа теплового контроля статорной обмотки электродвигателя была использована соответствующая

информационно-измерительная система (ИИС), разработанная на базе модульного конструирования по всем правилам агрегирования и принципам системного подхода [28]. Иными словами, был осуществлён процесс конструирования с условием конструктивной, технологической, метрологической, информационной и алгоритмической совместимости [29].

В качестве измерительного, согласующего и информационного компонентов ИИС применялись стандартные датчики температуры (ДТ) и многофункциональные компьютерные платы ввода-вывода сигналов, образующие модульную аппаратную платформу, ориентированную на активное использование возможностей шины PCI и программных технологий Microsoft Windows [30].

Для решения вопросов исследования и метрологического обеспечения ДТ и ИИС в целом использовалась методология применения интегрированной среды MatLab, имеющей все возможности для создания компьютерных моделей – виртуальных лабораторных стендов для прототипирования и тестирования систем, работающих в режиме реального времени [31].

Весь комплекс существующих задач решался на базе пакетов Simulink, Real-Time Workshop и Real-Time Windows Target среды разработки MatLab, позволяющих моделировать и исследовать реальные технические системы, в структуру которых входит персональный компьютер, а в качестве устройства ввода-вывода использовались универсальная плата PCI-1710HG и ее внешний терминал PCLD-8710 (рис.8) [32, 33].

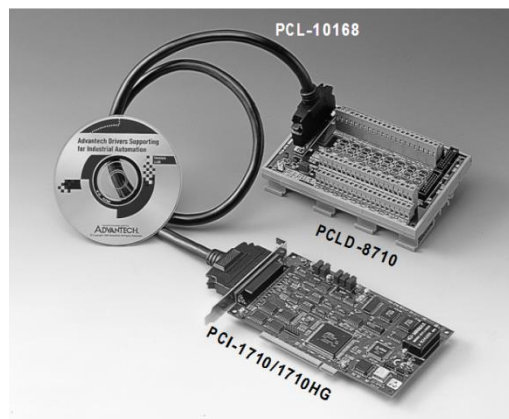


Рисунок 8 – Общий вид устройства ввода-вывода информационного сигнала

Следует отметить, что плата PCI-1710HG фактически представляет собой многофункциональный модуль для сбора данных и связи с внешними устройствами на базе PCI-шины, обладающий широким спектром возможностей для преобразования данных и управления, включая аналого-цифровое и цифро-аналоговое преобразования сигналов, цифровые входы и цифровые выходы, счетчик/таймер; может использоваться в информационно-измерительных комплексах, построенных на базе среды MatLab/Simulink.

Плата PCI-1710HG, находящаяся в системном блоке персонального компьютера, настраивалась и тестировалась с помощью поставляемого с ней программного обеспечения – тестовой программы Advantech Device Test, а для надежного и удобного подключения к ней внешних устройств (датчиков или других источников информации) использовался монтажный терминал PCLD-8710. Терминал PCLD-8710 и плата PCI-1710HG имеют 68-пиновые SCII-II разъемы.

Обобщенная блок-схема разработанной ИИС, ориентированной на исследование предлагаемого способа теплового контроля обмоток электродвигателя, представлена на рисунке 9, где ИП – источник питания электродвигателя; ЛТ – лабораторный термостат ПРО ТС 30/120-120; Объект – работающий электродвигатель, у которого температура статорной обмотки определяется новым косвенным методом (КМ) и известным методом

встраиваемых датчиков температуры (*МВДТ*); *ПИП₁* и *ПИП₂* – первичные измерительные преобразователи в виде соответственно датчика температуры КТУ 84/130 и измерительного трансформатора тока марки ТТИ-А 5/5А 5ВА кл. точности 0,5; *ВИП₁* и *ВИП₂* – вторичные измерительные преобразователи, дополнительно осуществляющие фильтрацию и усиление информационных сигналов; *МТ* – монтажный терминал; *ПК* – персональный компьютер; *RTA* (*Real-Time Application*) – специально разработанное программное приложение, работающее в реальном времени; *БП* – блок питания для *ВИП₁* и *ВИП₂*.

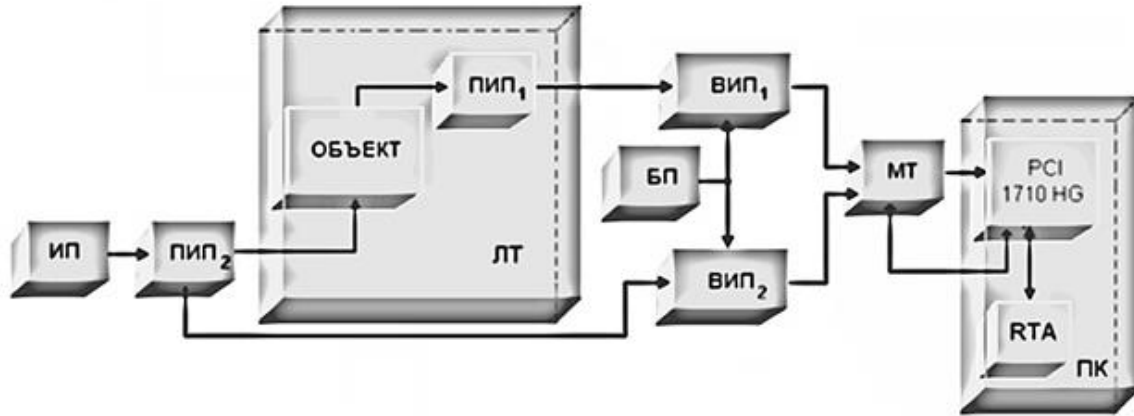


Рисунок 9 – Блок-схема *ИИС* для экспериментальных исследований

Температурный режим работы электродвигателя задавался *ЛТ* в диапазоне от +30 до +120 °С. Во внутреннем пространстве *ЛТ* располагался *Объект* (электродвигатель) с первичным измерительным преобразователем *ПИП₁*, посредством которого осуществлялась контрольная регистрации температуры статорной обмотки работающего электродвигателя. При контрольной регистрации температуры использовался известный *МВДТ*, при котором *ПИП₁* в виде кремниевого датчика температуры устанавливался в лобовые части обмотки статора электрической машины только на время испытаний.

В свою очередь, посредством *ПИП₂* осуществлялась рабочая регистрации температуры статорной обмотки работающего электродвигателя. Причем рабочая регистрация температуры реализовывалась новым *КМ*, при котором *ПИП₂* в виде измерительного трансформатора тока включался в цепь *ИП* электродвигателя (*Объекта*) последовательно с его статорной обмоткой. В этом случае сама обмотка статора являлась датчиком температуры

ВИП₁ и *ВИП₂* обрабатывали соответствующим образом, включая операцию нормирования, информационные сигналы, поступающие соответственно с *ПИП₁* и *ПИП₂*. В дальнейшем информационные сигналы через плату *МТ* передавались на вход платы *PCI-1710HG*, установленной на *PCI*-шину материнской платы *ПК*. В этом случае плата *PCI-1710HG* являлась неотъемлемой функциональной частью *ПК*. Совместное функционирование *ПК* и платы *PCI-1710HG* осуществлялось через соответствующий стандартный драйвер. В *ПК* измеренная информация обрабатывалась с помощью специально разрабатываемого приложения *RTA*.

По результатам этой обработки определялось текущее тепловое состояние электродвигателя, регистрируемое посредством реализации *КМ* и *МВДТ*. Все процедуры обработки полученных опытным путем данных и расчета температуры нагрева обмотки производились по соответствующим алгоритмам.

Для обеспечения нормального функционирования *ИИС* прежде всего устанавливался драйвер и настраивалась соответствующим образом плата *PCI-1710HG*. Настройка среды *MatLab* и расширяющих ее возможности пакетов, предназначенных для работы в реальном времени, позволили создать информационно-измерительную и управляющую системы, в контур которых был включен *ПК*. Этими пакетами являлись пакет визуального моделирования *Simulink*, пакет генерации *C*-кода и пакет создания исполняемых в реальном

времени приложений Real-Time Workshop, а также библиотека блоков для связи с внешними устройствами Real-Time Windows Target.

В этом случае Real-Time Windows Target использует стандартные платы ввода/вывода для PC-совместимых компьютеров. При рассмотрении модели ИИС в реальном времени Real-Time Windows Target вводит дискретизированные данные из одного или нескольких каналов ввода, используя эти данные в качестве входов для Simulink-модели; оперативно обрабатывает данные и посылает их обратно во внешнюю среду через каналы вывода на плате ввода/вывода. Кроме того, Real-Time Windows Target предусматривает наличие специальной библиотеки Simulink-блоков и поддерживает широкий набор плат ввода/вывода: ISA, PCI, PCMCIA платы, в общем случае свыше 200 видов плат. В свою очередь библиотека блоков драйверов ввода/вывода содержит универсальные драйверы для поддержки плат ввода-вывода. Эти блоки используются при построении Simulink-модели так же, как и стандартные Simulink-блоки.

Блоки ввода/вывода пакета Real-Time Windows Target обеспечивают программный интерфейс между АЦП (платой PCI-1710HG) и приложением, исполняемым в реальном времени. С их помощью можно моделировать систему 'hardware-in-the-loop' и наблюдать, как Simulink-модели ведут себя в реальном мире. Библиотека блоков, например, включает следующие типы блоков: блок для приема аналоговых сигналов Analog Input, блок для передачи выходного аналогового сигнала Analog Output, блок для приема цифрового сигнала Digital Input, блок для передачи цифрового сигнала Digital output, вход-счетчик Counter Input. В качестве примера можно привести следующие настраиваемые параметры блоков: имя драйвера АЦП; время между двумя последовательными выборками (величина, обратная частоте дискретизации аналогового сигнала); номера каналов, соответствующие указанным номерам на монтажном терминале PCLD-8710 платы PCI -1710HG; диапазон изменения величины аналоговых сигналов и другие.

В результате многократных измерений температуры статорной обмотки с использованием *КМ* и *МВДТ* были получены значения температуры нагрева T_{KM} и $T_{МВДТ}$. В плане постановки задачи требуется оценить систематические ошибки способов измерения. Для этого необходимо проверить, можно ли считать существующее расхождение между результатами измерений двумя методами случайным или оно является значительным (существенным), т.е. необходимо определить, оказывает ли предлагаемый способ измерения температуры *КМ* влияние на результаты измерения переменной T .

При обосновании метода анализа результатов наблюдений, реализованных посредством *КМ* и *МВДТ*, была выдвинута гипотеза о том, что расхождение случайно, т.е. «истинные» среднеквадратические отклонения температур совпадают. Тогда эта нулевая гипотеза может быть сформулирована следующим образом: $\sigma_{T_{KM}} = \sigma_{T_{МВДТ}}$. При такой постановке задачи наиболее целесообразным для ее решения является применение метода однофакторного дисперсионного анализа, в котором рассматривается влияние одного качественного фактора – использование нового способа измерения температуры, а в качестве статистического критерия согласия применяется критерий Фишера (*F*-критерий) [33]:

$$F_{расч.} = s_A^2 / s_{om}^2,$$

где s_A^2 – дисперсия между выборками (характеризует систематические изменения процесса); s_{om}^2 – дисперсия внутри выборки (характеризует случайные изменения процесса).

Следует отметить, что положительным свойством данного метода является его эффективность даже при относительно небольшом объеме выборки значений выходного параметра измерительного процесса, а для оценки случайных погрешностей измерения можно применять известные методы статистических характеристик выходного параметра измерительного преобразователя.

Для анализа результатов экспериментальных исследований использовался программный модуль, состоящий из специализированных подпрограмм, реализующих следующие процедуры: формирование входного массива данных; статистическую обработку

результатов измерения; проверку рабочих гипотез по критерию Бартлетта. Результаты дисперсионного анализа алгоритмической обработки массивов данных представлены в таблице 1.

По результатам дисперсионного анализа было получено следующее расчетное дисперсионное отношение:

$$F_{расч.} = 2,74.$$

Далее по заданному уровню значимости $q=5\%$ для степеней свободы $f_1 = N \cdot (m-1) = 8$ и $f_2 = (N - 1) = 1$ определялось критическое дисперсионное отношение $F_{крит} = 5,32$, где $N=2$ – количество условий проведения эксперимента (два способа измерения температуры); $m=5$ – число дублирующих опытов) по соответствующей таблице F -распределения [34].

Таблица 1

Результаты дисперсионного анализа

Компонент дисперсии	Сумма квадратов отклонений	Число степеней свободы	Средний квадрат (выборочные дисперсии)
Между способами	$S_x = 0,1$	$N-1=1$	$S^2_x = 0,1$
Внутри способа	$S_o = 0,292$	$N \cdot (m-1) = 8$	$S^2_o = 3,65 \times 10^{-2}$
Общая	$S = 0,392$	$(N \cdot m - 1) = 9$	$S^2 = 4,36 \times 10^{-2}$

В связи с тем, что полученное из наблюдений расчетное $F_{расч.}$ не превышает критическое $F_{крит}$, то влияние нового способа измерения признается незначимым. Таким образом, нулевая гипотеза о том, что оба метода измерения одинаково точны, не противоречат выходным данным процесса измерения. Исходя из этого, можно с полной уверенностью утверждать, что состоятельность предлагаемого способа контроля теплового режима электродвигателя подтверждена результатами экспериментальных исследований. Кроме того, полученные результаты показали достаточно высокую точность контроля температуры обмотки предложенным способом и схмотехническим решением соответствующего устройства тепловой защиты, которая составила $\Delta T = T_{KM} - T_{МВДТ} = \pm 3^{\circ}\text{C}$ в диапазоне температур от 50°C до 130°C и является вполне приемлемой для систем контроля температуры обмоток электродвигателя.

Следует отметить также тот положительный факт, что использование предложенной системы контроля не только не оказало существенного влияния на нагрев испытуемого АД, но и не сказалось на режиме его работы и на выходных показателях его функционирования.

Заключение

Разработанный способ измерения температуры обмоток, находящихся под переменным напряжением, обеспечивает возможность постоянного оперативного измерения без отключения питания и вывода электрооборудования из процесса эксплуатации. За счет отсутствия измерительного шунта, включенного последовательно в рабочую цепь обмотки, обеспечивается упрощение его практической реализации, а также повышается надежность контроля и, соответственно, работы электрооборудования в целом. Кроме того, за счет отсутствия дополнительных потерь мощности в измерительном шунте повышается КПД системы.

Предложенный аппаратный вариант реализации нового способа позволяет получить с

достаточной для практического применения точностью зависимость измерения температуры обмотки, что позволяет легко осуществить тепловую защиту электрооборудования.

Следует отметить, что предложенный способ контроля температуры и реализующее его устройство могут быть применены для любого электрооборудования, имеющего обмотки, которые питаются переменным током, например, для электрических машин, трансформаторов, реакторов, электромагнитов и т.п.

Литература

1. Юдаев И. В., Живописцев Е. Н. Электрический нагрев. – М.: Лань, 2021. – 196 с.
2. Козлов А.Н. Основы эксплуатации электрооборудования: учебное пособие. – Благовещенск: Изд-во АмГУ, 2014. – 114 с.
3. Бодров М. В., Кузин В. Ю. Теплотехнические измерения и приборы: учеб. пособие. – Н. Новгород: ННГАСУ, 2015. – 176 с
4. Michalski L., Eckersdorf K., Kucharski J., McGhee J. Temperature Measurement. New York, J. Wiley, 2002.
5. Nawrocki W. Measurement Systems and Sensors, Second Edition. Artech, 2015. 440 p.
6. Вихарева Н.А., Бродников А.Ф., Достовалов Н.Н. Метрологическое обеспечение теплотехнических измерений. Основы термометрии. – Новосибирск: СГУГиТ, 2020. – 51 с.
7. Martien D. et al. An Ultrasensitive Differential Capacitive Dilatometer, in IEEE Transactions on Magnetics, 2019, vol. 55, no. 2, pp. 1-4. doi: 10.1109/TMAG.2018.2866831.
8. Gu Y. et al. A temperature-modulated dilatometer by using a piezobender-based device. Review of Scientific Instruments, 2020, 91, 123901. DOI:10.48550/arXiv.2001.09450.
9. Pavese F. Manometric Thermometry. In book: Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook Edition: SecondChapter, CRC Press, Boca Raton, 2014, 75, Vol.1, pp.75-1. DOI:10.1201/b15474-83.
10. Nau M. Electrical Temperature Measurement with thermocouples and resistance thermometers. 2002, 163 p. ISBN: 3-935742-07-X.
11. Nau M. Electrical Temperature Measurement with thermocouples and resistance thermometers. Jumo, FAS, 2002. 161 pp.
12. Jha Ch. M. Thermal Sensors: Principles and Applications for Semiconductor Industries, Springer, 2015. 141 p.
13. Тумайкин Д., Тумайкин М. Прецизионный термометр для промышленного применения на основе термочувствительных кварцевых резонаторов // Компоненты и технологии, 2008, № 1. С. 72-73.
14. Xu J., Li X., Duan Jh. et al. High-precision low-power quartz tuning fork temperature sensor with optimized resonance excitation. Journal of Zhejiang University SCIENCE C. 2013, Vol. 14, 264–273 pp. <https://doi.org/10.1631/jzus.C12MNT05>.
15. Карачанов В., Карачанов Л., Ильин С. Методы тепловизионной термометрии гетерогенных систем. LAP Lambert Academic Publishing, 2012. – 296. ISBN 9783847329169
16. Jiang J., Ma G. Temperature Detection with Optical Methods, in Optical Sensing in Power Transformers, IEEE, 2021, pp.15-36, doi: 10.1002/9781119765325.ch2.
17. Ukiwe E.K., Adeshina S.A., Tsado, J. Techniques of infrared thermography for condition monitoring of electrical power equipment. Journal of Electrical Systems and Information Technol, 2023, Vol. 10, article 49. <https://doi.org/10.1186/s43067-023-00115-z>.

18. Bao Y., Bao Y., Wang Z. et al. A Machine Olfaction-Based Overheating Diagnosis Method for Electrical Equipment. *IEEE Access*, 2023, Vol. 11, p.p. 108804-108817 DOI:10.1109/ACCESS.2023.3320714.
19. Пушкарев М. Популярные контактные технологии термометрии // *Компоненты и технологии*, 2006, № 1. С. 140-146.
20. Бочкарев И.В., Галбаев Ж.Т., Келебаев К.К. Диагностика теплового состояния электрических машин силового электрооборудования ТЭС // *Известия КГТУ*, 2017. – № 4 (44). – С. 64–72.
21. Albla A. A. H., Brkovic B. M., Ječmenica M. M., Laz-arevic Z. M. Online temperature monitoring of a grid connected induction motor. *Engineering*, 2017, p. 276-282.
22. 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. DOI:10.17485/ijst/2012/v5i3.6.
23. Lee J., Yoo J., Sul S.-K. Stator Resistance Estimation using DC Injection Robust to Inverter Nonlinearity in Induction Motors. *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2020, pp.2425-2430. DOI:10.1109/ECCE44975.2020.9235816.32.
24. Yassin A., Elzalik M. Signal Injection Based Sensorless Online Monitoring of Induction Motor Temperature. *23rd International Middle East Power Systems Conference (MEPCON)*, 2022. DOI:10.1109/MEPCON55441.2022.10021694.
25. Брякин И.В., Бочкарев И.В., Багиев Х.Г., Келебаев К.К. Контроль температуры обмоток и защита от перегрева электрических машин переменного тока // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика»*. – 2019. – Т. 19, №1. – С.75–84. DOI: 10.14529/power190109.
26. Бочкарев И.В., Брякин И. В. Багиев Х.Г. Устройство для тепловой защиты электрической машины. Пат. Кыргызстана № 2189, опубл. 31.01.2020. Бюл. № 1.
27. Кобозев В. А. Электрические машины. Часть 2. Электрические машины переменного тока. – Ставрополь: Сервис школа, 2015. – 208 с.
28. Цапенко М.П. Измерительные информационные системы: Структуры и алгоритмы, системотехническое проектирование.–М.: Энергоатомиздат, 1985. – 438 с
29. Брякин И.В. Лыченко Н.М. Применение объектно-ориентированного подхода к проектированию информационно-измерительных систем//*Доклады международной конференции «Проблемы управления и информационных технологий*. – Бишкек: Илим, 2010 – С. 188 –192.
30. Брякин И.В., Лыченко Н.М. Методические рекомендации по применению аппаратного интерфейса PCI-1710HG для построения систем реального времени: научно-методическое пособие. – Бишкек: изд. ИАИТ, 2017. – 62 с
31. Яблочников Е.И. Методологические основы построения АСТПП. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2005. – 84 с.
32. PCI-1710 Series. User's Manual. Advantach Co.Ltd. 110 pp.
33. PCLD-8710 Series. User's Manual. Advantach Co.Ltd. 8 pp.
34. Левин Б.Р., Шварц В. Вероятностные модели и методы в системах связи и управления. – М.: Радио и связь, 1985. – 312 с.