

## КОНТРОЛЬ ТЕМПЕРАТУРЫ ОБМОТОК И ЗАЩИТА ОТ ПЕРЕГРЕВА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

**И.В. Брякин<sup>1</sup>, И.В. Бочкарев<sup>2</sup>, Х.Г. Багиев<sup>2</sup>, К.К. Келебаев<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Институт автоматики и информационных технологий НАН КР,

г. Бишкек, Кыргызская республика

<sup>2</sup> Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова,

г. Бишкек, Кыргызская республика

<sup>3</sup> Бишкекский технический колледж, г. Бишкек, Кыргызская республика

Рассмотрены и проанализированы основные методы контроля температуры обмоток электрических машин переменного тока (ЭМ), такие как методы термометра, сопротивления и заложённых термопреобразователей, предусмотренные ГОСТ 11828–86, а также косвенные методы контроля, основанные на результатах прямых измерений других физических величин, функционально связанных с искомой величиной, и расчетные методы контроля, и расчетные методы, основанные на математическом моделировании процессов нагрева машины с использованием тепловых схем замещения. Показано, что наиболее целесообразным методом контроля температуры обмотки ЭМ является метод сопротивления, основанный на принципе зависимости активного сопротивления проводника от температуры, в котором в качестве термодатчика используется непосредственно сама обмотка ЭМ. При этом проблема теплового контроля обмоток ЭМ в полном объеме не решена и требует разработки новых принципов построения систем оперативного контроля нагрева. Предложен новый способ контроля нагрева обмоток ЭМ непосредственно в процессе работы без отключения от сети и без нарушения нормального режима работы, основанный на использовании в качестве дополнительного информативного параметра фазовых соотношений между измеряемыми величинами. Анализируются физические эффекты, лежащие в основе данного способа контроля, описан регламент необходимых операционных процедур при его реализации. Показано, что на основе предложенного способа контроля температуры легко построить систему тепловой защиты, которая может осуществляться как в режиме отключения ЭМ, так и в режиме контрольной сигнализации. Приведены результаты экспериментальной проверки устройства, реализующего предложенный способ.

*Ключевые слова:* электрические машины переменного тока, термоконтроль, способы контроля температуры обмоток, термодатчик, амплитудный детектор, фазовый детектор, аналоговый перемножитель двух сигналов, аналоговый делитель двух сигналов.

### Введение

Электрические машины переменного тока, к которым относятся вращающиеся асинхронные и синхронные машины, а также трансформаторы, являются самым распространенным типом электрических машин (ЭМ), широко использующимся на практике. Поэтому требования к их работоспособности, надежности и долговечности очень велики.

К основным показателям, характеризующим надежность и срок службы любой ЭМ, относится ее нагрев. Именно по величине нагрева можно оценить нагрузку машины, условия ее работы и охлаждения, а также наличие нарушения правил технической эксплуатации электрооборудования. При этом одним из самых нагруженных в тепловом отношении узлов ЭМ являются их обмотки, что подтверждает анализ статистики причин выхода из строя различных ЭМ – до 80 % всех отказов приходится на их обмотки. Это обусловлено тем, что именно обмотка является наиболее уязвимым узлом машины, поскольку повышение температуры приводит к интенсивному старению изоляции обмоток, что, в свою очередь, приводит к

снижению электрической и механической прочности изоляции и, в конечном счете, к появлению тяжёлых аварийных режимов.

В настоящее время для максимального использования активного объема ЭМ и увеличения тем самым удельной мощности ЭМ как при их проектировании, так и при эксплуатации стремятся к их максимально возможному температурному использованию. Следовательно, при эксплуатации ЭМ необходимо осуществлять постоянный термоконтроль, что позволит обеспечить защиту машины от перегрева и увеличить тем самым надежность работы и ее ресурс. Обычно тепловое состояние ЭМ оценивают по средним температурам ее обмоток, предельно допустимая величина которых ограничивается для каждой конкретной машины. Таким образом, внедрение систем управления, обеспечивающих повышенную точность контроля теплового режима обмоток ЭМ и снижение тем самым интенсивности их отказов и предупреждение наступления аварийных ситуаций, является одним из важнейших направлений дальнейшего развития техники.

### Постановка задачи

Поскольку одним из основных факторов, влияющих на срок службы изоляции обмоток, является тепловой фактор, то при эксплуатации электрических машин необходим постоянный контроль, обеспечивающий получение достоверной информации о температуре их обмоток. Очевидно, что такой контроль необходимо проводить в течение всего жизненного цикла машины, причем выполнять диагностические процедуры наиболее целесообразно непосредственно в рабочих режимах машины без вывода ее из эксплуатации. Соответственно, требования к точности и надежности системы термоконтроля обмоток достаточно жесткие, так как от них напрямую зависит надежность работы ЭМ. При этом эта система должна обеспечивать возможность ее использования для уже готовых и находящихся в эксплуатации ЭМ без их дополнительных конструктивных доработок. Такая система контроля должна быть надежной и достоверной, иметь высокое быстродействие и обеспечивать стабильность работы по отношению к внешним факторам, которые могут изменяться в процессе работы. При этом очевидно, что выбор типа системы термоконтроля определяется не только техническими, но и экономическими показателями. Таким образом, разработка надежной, достоверной и при этом недорогой системы контроля температуры обмоток, обеспечивающей повышенную точность измерения, является важной и актуальной проблемой.

### Обзор способов контроля температуры

Для создания высокоэффективной системы контроля температуры, которая будет отвечать перечисленным выше требованиям, сначала проведем анализ известных способов измерения. Основные способы контроля температуры обмоток ЭМ приведены в ГОСТ 11828–86 [1]. К ним относятся методы термометра, сопротивления и заложных термопреобразователей. Кроме того, в настоящее время широко применяются также косвенные и расчетные методы контроля.

*Методом термометра* можно контролировать температуру любой доступной части обмотки, например, лобовой части, к которой можно приложить термочувствительные измерительные средства (термометры, термопреобразователи сопротивления, термопары, полупроводниковые терморезисторы и т. п.). Однако при этом будет контролироваться тепловое состояние только поверхности обмотки, температура которой отличается от температуры всей обмотки.

*Методом сопротивления* основан на свойстве металлов изменять свое активное сопротивление в зависимости от температуры. Измерение температуры обмоток машин переменного тока этим методом производится в основном после отключения питания и полной остановки машины путем пода-

чи на обмотку постоянного тока, измерения сопротивления  $R_{\Gamma}$  обмотки методом вольтметра и амперметра и последующего вычисления перегрева обмотки с использованием заранее известной величины сопротивления  $R_X$  при фиксированной температуре  $T_X$  по формуле

$$\Delta T = [(R_{\Gamma} - R_X) / R_X] (K + T_X) + T_X - T_0, \quad (1)$$

где  $\Delta T$  – среднее превышение температуры обмотки;  $K$  – коэффициент, равный для меди 235, а для алюминия – 245;  $T_0$  – температура окружающей среды при испытаниях.

Главный недостаток этого метода заключается в необходимости отключения машины от сети и, соответственно, вывода ее из эксплуатации. Это не только нарушает технологический процесс работы оборудования, но и не позволяет корректно измерить температуру обмоток ЭМ, работающих в режимах, отличных от S1. Более того, при применении данного метода возникает дополнительная погрешность, которая обусловлена тем, что после отключения ЭМ и до момента измерения проходит определенное время, в течение которого тепловое состояние машины изменяется. Частично снизить погрешность в соответствии с [1] можно путем экстраполяции кривой нагрева.

Для исключения этих недостатков предусмотрены способы, позволяющие без отключения ЭМ переменного тока от сети пропускать по обмотке постоянный измерительный ток, который накладывается на рабочий переменный ток от постороннего дополнительного источника постоянного тока [2–4]. Однако включение источника постоянного тока в цепь переменного тока требует защиты от переменного напряжения как самого этого источника, так и всей измерительной схемы. Для этого необходимо использование специальных фильтров, что снижает точность измерений, усложняет измерительное оборудование и снижает его надежность.

Во избежание этого недостатка были разработаны устройства, в которых постоянный измерительный ток или формируется непосредственно из рабочего переменного тока, или вводится от дополнительного источника постоянного тока без применения фильтров. Блок-схемы этих устройств показаны соответственно на рис. 1а и 1б [5, 6].

Устройства содержат: 1 – термодатчик в виде обмотки ЭМ; 2 – блок ввода измерительного постоянного тока; 3 – измерительный шунт; 4 – блок измерения величины измерительного постоянного тока  $I_{\text{изм}}$ ; 5 – блок измерения величины падения напряжения на термодатчике 2 от тока  $I_{\text{изм}}$ ; 6 – вычислительный блок. Измерительный ток  $I_{\text{изм}}$  может быть сформирован из рабочего переменного тока за счет обеспечения неравенства площадей полуwave различной полярности этого переменного тока посредством двух диодов  $D_1$ ,  $D_2$  и резистора  $R_{\text{пер}}$  (см. рис. 1а), или введен при помощи дополнительного источника 7 (см. рис. 1б).

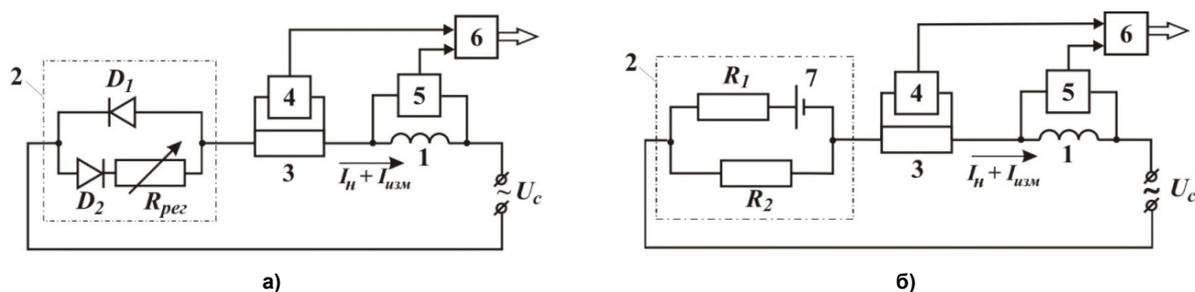


Рис. 1. Принципиальные блок-схемы устройств с постоянным измерительным током

Видно, что в первом случае (см. рис. 1а) величину постоянного измерительного тока  $I_{изм}$  можно регулировать путем изменения величины сопротивления резистора  $R_{пер}$ . Однако этот ток  $I_{изм}$  будет иметь пульсирующий характер, что вносит определенную неточность в расчет нагрева обмотки.

Для повышения точности измерения ввод постоянного измерительного тока  $I_{изм}$  можно осуществить при помощи дополнительного источника 7 постоянного тока, включенного по схеме, изображенной на рис. 1б. Для защиты этого источника от действия рабочего переменного тока необходимо, чтобы ток по нему протекал в одну сторону. Для этого параметры резисторов  $R_1$  и  $R_2$ , входящих в блок 1 по рис. 2, необходимо рассчитать с учетом сопротивления контролируемой обмотки 1 [6, 7].

Величина сопротивления  $R_{обм}$  обмотки статора АД вычисляется в блоке 6 по закону Ома по отношению показаний блоков 5 и 4, а перегрев обмотки определяется по величине сопротивления  $R_{обм}$  по формуле (1).

Таким образом, описанные способы и устройства позволяют проводить контроль температуры непосредственно на работающей машине, однако наличие постоянного измерительного тока  $I_{изм}$  приводит к изменению ее режима работы и, соответственно, к ухудшению эксплуатационных показателей.

Метод заложенных термопреобразователей позволяет определять температуру в месте их установки. Для этого на стадии изготовления машины в места, где ожидаются наибольшие превышения температуры, например, внутрь паза, устанавливаются термодатчики в виде термопреобразователей сопротивления, термопар и т. п., совместно с которыми применяются соответствующие измерительные устройства, которые предварительно градуируют. Однако этот метод требует установки термодатчиков еще на стадии изготовления машины, причем для их размещения, например, в пазовой части обмотки необходимо заранее увеличить габарит машины. Соответственно, в уже готовой машине установка таких термодатчиков невозможна. Кроме того, этот способ позволяет контролировать локальную температуру только в той точке, где установлен термодатчик.

Косвенные методы теплового контроля основаны на результатах прямых измерений других физических величин, функционально связанных с искомой величиной. В этом случае значение измеряемой величины получают путем решения уравнения

$$x = F(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (2)$$

где  $x_1, x_2, \dots, x_n$  – значения величин, полученных прямым измерением.

В качестве примера можно привести так называемый метод инфракрасного излучения с использованием пирометров и тепловизоров, при котором фиксируют инфракрасное излучение, испускаемое нагретыми поверхностями [8–10]. Несмотря на то, что этот метод позволяет осуществлять бесконтактный тепловой контроль нагрева [11, 12], для непосредственного измерения теплового состояния обмоток он практически не применим и обеспечивает лишь приблизительную оценку их вероятного нагрева.

В качестве другого примера можно привести контроль за нагревом ЭМ, при котором контролируют не температуру обмотки, а, строго говоря, правильность эксплуатации машины, а именно, нагрузку машины, условия и частоту пусков, параметры питающей сети, условия охлаждения, температуру охлаждающей среды и т. п. [13]. Если эти показатели не выходят за допустимые нормы, то предполагается, что перегревов не будет. Очевидно, что такой косвенный контроль не обладает высокой точностью и приемлемой достоверностью.

Расчетные методы контроля основаны на математическом моделировании процессов нагрева машины с использованием тепловых схем замещения [14–16] и в последнее время нашли широкое распространение при контроле температуры обмоток электрических машин. При составлении таких схем учитывают, что имеет место полная аналогия математического описания тепловых и электрических потоков и тепловых и электрических сопротивлений. Соответственно, машину, имеющую распределенные тепловые источники (потери) и тепловые параметры, заменяют эквивалентной схемой, составляют для нее систему уравнений теплового баланса и решают ее с использованием основных законов Кирхгофа для электрических цепей. При вычислении температуры от-

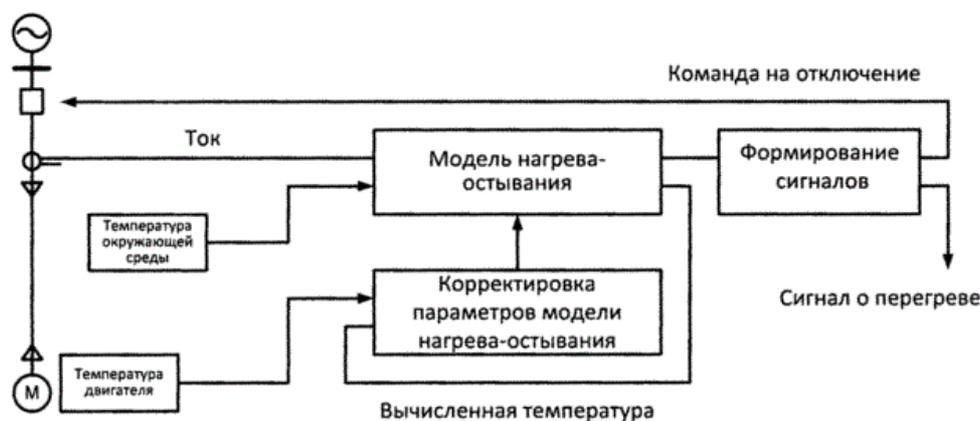


Рис. 2. Структурная схема устройства контроля температуры с использованием тепловой модели ЭМ

дельных элементов машины учитывается величина и время протекания тока.

Однако такой метод обеспечивает низкую точность вычисления температуры обмотки. Это объясняется тем, что результаты вычисления будут содержать погрешности, вызванные как неточностью параметров тепловой модели ЭМ, так и погрешности, возникающие вследствие изменения условий охлаждения двигателя, а именно, изменения параметров окружающей среды (температуры, влажности и т. п.), изменения условий охлаждения (изменение частоты вращения, нарушение вентиляции и т. п.). Поэтому для повышения точности в [17, 18] предлагается периодически уточнять параметры тепловой схемы замещения. На рис. 2 в качестве примера представлена структурная схема устройства, реализующего такой метод.

На поверхности машины устанавливается датчик, при помощи которого непосредственно измеряется температура в месте его установки. Модель нагрева-остывания электродвигателя строится с двумя выходами таким образом, что вычисляется температура обмотки и температура на поверхности машины в месте установки датчика. В определенные моменты времени производят сравнение значений температур, измеренной датчиком и вычисленной по модели. При наличии рассогласования между этими значениями температуры в модель нагрева-остывания машины вводят корректировку ее параметров, что повышает степень адекватности модели и реального процесса и, соответственно, сказывается на точности расчета температуры обмотки. Однако даже такая периодическая корректировка параметров тепловой модели двигателя не обеспечивает высокую точность расчета температуры, поскольку условия теплоотдачи двигателя остаются изменяемыми и непредсказуемыми.

Таким образом, видно, что проблема теплового контроля обмоток ЭМ в полном объеме не решена и требуется разработка новых принципов построения систем оперативного контроля нагрева

обмоток ЭМ переменного тока непосредственно в процессе работы без отключения от сети и без нарушения нормального режима работы.

Следует также подчеркнуть, что достоверный контроль температуры обмоток позволяет организовать систему тепловой защиты ЭМ от перегрева, которая будет обеспечивать надежную защиту ЭМ при аварийных и ненормальных режимах работы и при этом не допускать ложных срабатываний [19]. Наличие такой тепловой защиты позволяет увеличить рабочий ресурс ЭМ, обеспечить безаварийную работу и повысить эксплуатационную надежность.

## Результаты исследований

Проведенный анализ способов термоконтроля обмоток ЭМ, в частности электрического двигателя (ЭД), показал, что каждый из них имеет определенные недостатки, обусловленные особенностями реализованных в них физических явлений и подходов к процессу контроля температуры, которые в конечном счете и определяют возможности каждого способа.

Обобщая, можно констатировать, что наиболее целесообразным методом контроля температуры обмотки ЭД является метод сопротивления, основанный на принципе зависимости активного сопротивления проводника от температуры, в котором в качестве термодатчика используется непосредственно сама обмотка ЭД.

Известно, что при реализации процессов измерений и обработке их результатов широко используются различные подходы, основанные на определенных видах априорной информации:

- 1) информация о диапазоне изменения измеряемой величины, необходимая для выбора соответствующего средства измерений;
- 2) информация о скорости изменения измеряемой величины, ее спектре и корреляционной функции, используемая для выбора интервала дискретизации и средств измерений с подходящими динамическими характеристиками, а также для коррекции погрешности измерений;

3) информация о флуктуациях измеряемой величины, необходимая для синтеза оптимальных фильтров, расчета погрешности результатов измерений и оценки погрешности интерполяции по дискретным отсчетам;

4) информация об исследуемой зависимости между измеряемыми величинами, необходимая для планирования оптимальных экспериментов по определению этой зависимости;

5) информация о влияющих величинах, необходимая для оценки погрешности измерений;

6) информация о плотности распределения измеряемой величины, используемая при составлении алгоритмов статистического оценивания измеряемой величины и проверке статистических гипотез.

При этом следует отметить, что информация о функциональной связи между измеряемыми величинами, обусловленная свойствами самого объекта измерений, применяется относительно редко, хотя использование информации о функциональных связях между измеряемыми величинами позволяет достичь повышения точности измерений без привлечения особых дополнительных ресурсов. В случае применения данного подхода его эффективность будет зависеть, в первую очередь, от способа задания и достоверности априорных сведений об известных функциональных связях.

Исходя из приведенных выше соображений, предлагается новый подход к построению систем оперативного контроля температуры, который базируется на использовании метода измерения сопротивления обмоток переменного тока без отключения от сети (в рабочем режиме ЭД) и дополнительной априорной информации о функциональной связи между измеряемыми величинами в виде соответствующих фазовых соотношений между ними [20, 21].

На рис. 3 приведена принципиальная блок-схема предлагаемого варианта устройства для контроля температуры обмотки и тепловой защиты ЭД: 1 – измерительный шунт; 2 – обмотка ста-

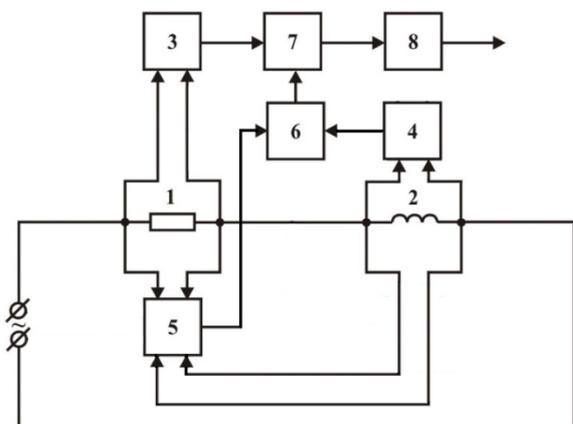


Рис. 3. Блок-схема устройства для контроля температуры обмотки и тепловой защиты ЭД

тора ЭД, используемая в качестве термодатчика; 3 – первый регистрирующий блок (амплитудный детектор); 4 – второй регистрирующий блок (амплитудный детектор); 5 – третий регистрирующий блок (фазовый детектор); 6 – первый вычислительный блок (аналоговый перемножитель сигналов); 7 – второй вычислительный блок (аналоговый делитель двух сигналов); 8 – блок регистрации температуры обмотки 2 ЭД.

Если векторы напряжений на измерительном шунте и обмотке статора ЭД совместить соответствующим образом с осями координат на комплексной плоскости  $\dot{I}_{III}$  (рис. 4), то можем записать

$$\dot{U}_{OC} = \dot{U}_R + \dot{U}_X = \dot{I}_{III} \cdot R + j \cdot \dot{I}_{III} \cdot X. \quad (3)$$

Из (3) имеем

$$U_R = |\dot{U}_{OC}| \cdot \cos(\arg \dot{U}_{OC}), \quad (4)$$

где  $\dot{U}_{OC}$  – вектор напряжения на обмотке статора ЭД;  $\dot{U}_R$  и  $\dot{U}_X$  – комплексы действующих значений напряжений соответственно на активном  $R$  и реактивном  $X$  сопротивлениях обмотки статора ЭД;  $\dot{I}_{III}$  – комплекс действующего значения тока через шунт.

Известно, что преобразование переменного напряжения в постоянное в определенном диапазоне значений и диапазоне частот осуществляется посредством детектора, который для рассматриваемого случая должен функционировать в режиме амплитудной демодуляции. Иными словами, на входе такого детектора действующих значений присутствует АМ-колебание:

$$u_{вх}(t) = U_{m вх} (1 + M \cos \Omega t) \cos \omega_0 t. \quad (5)$$

Это АМ-колебание преобразуется в выходной низкочастотный (или постоянный при  $\Omega = 0$ ) сигнал, пропорциональный информативному параметру:

$$u_{вых}(t) = U_{m вых} \cdot \cos \Omega t. \quad (6)$$

В этом случае эффективность работы детектора оценивается коэффициентом детектирования,

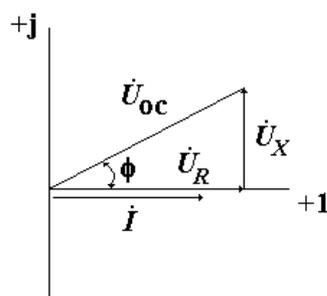


Рис. 4. Векторная диаграмма

равным отношению амплитуды низкочастотного сигнала (или постоянного) на выходе к размаху изменения амплитуды высокочастотного сигнала на входе:

$$k = \frac{U_{m \text{ вх}}}{M \cdot U_{\text{max}}} \quad (7)$$

Для реализации дополнительной априорной информации о функциональной связи между измеряемыми величинами  $\dot{U}_{\text{OC}}$  и  $\dot{I}_{\text{Ш}}$  предполагается использование линейного фазового детектора (частный случай синхронного детектора), представляющего собой устройство для демодуляции колебаний полной фазой  $\Psi(t) = \omega_0 t + \varphi(t)$ , промодулированных по фазовому углу.

Работа таких детекторов основана на нелинейном взаимодействии модулированного сигнала с немодулированным опорным колебанием, которое должно создаваться вспомогательным внешним источником. Сравнение фаз при этом можно осуществлять несколькими способами:

1) использование перемножителей колебаний входного сигнала  $U_{\text{вх}}(t)$  и опорного колебания  $U_0(t)$ , т. е.  $U_{\text{вх}}(t) \cdot U_0(t)$ ;

2) путем нелинейного преобразования суммы сигналов  $[U_{\text{вх}}(t) + U_0(t)]^2$ ;

3) на основе балансных фазовых устройств, в которых изменение фазы преобразовываются в изменение амплитуды вспомогательного сигнала и затем его последовательного амплитудного детектирования;

4) использование ключевых сигналов (фазочувствительные выпрямители).

Наиболее предпочтительным для рассматриваемого случая является вариант фазового детектора на основе перемножителя, обобщенная блок-схема которого представлена на рис. 5.

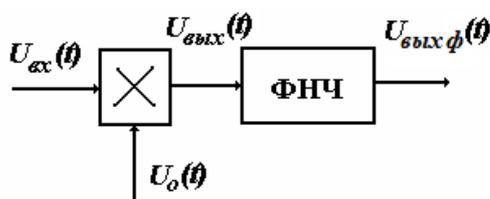


Рис. 5. Фазовый детектор на основе перемножителя

В результате перемножения выходной сигнал будет равен

$$U_{\text{вых}}(t) = M \cdot U_0(t) \cdot \cos \omega t \cdot U_{\text{вх}}(t) \cdot \cos(\omega t + \varphi) = \\ = M \cdot U_0(t) \cdot U_{\text{вх}}(t) \cdot [M_1 \cdot \cos(2\omega t + \varphi) + M_2 \cdot \cos \varphi], \quad (8)$$

где  $M$ ,  $M_1$  и  $M_2$  – масштабные коэффициенты.

На выходе фильтра низких частот (ФНЧ), который не пропускает высокочастотную составляющую, имеющую частоту  $2\omega$ , выходное напряжение фильтра будет равно

$$U_{\text{вых}\varphi}(t) = M_3 \cdot U_0(t) \cdot U_{\text{вх}}(t) \cdot \cos \varphi, \quad (9)$$

где  $M_3$  – масштабный коэффициент.

С учетом вышесказанного, рассмотрим особенности функционирования устройства, представленного на рис. 3.

Гармонический сигнал в виде падения напряжения с измерительного шунта 1, пропорциональный его активному сопротивлению, преобразуется амплитудным детектором 3 в электрический сигнал, соответствующий амплитудному значению тока в рассматриваемой электрической цепи:

$$U_{1\text{ад}} = K_{1\text{ад}} \cdot I_{m \text{ Ш}}. \quad (10)$$

Этот же гармонический сигнал поступает на первый вход фазового детектора 5, на второй вход которого подается напряжение с обмотки ЭД. При этом на выходе блока 5 формируется электрический сигнал, величина которого пропорциональна косинусу разности фаз  $\varphi$  между напряжением с обмотки ЭД и напряжением с измерительного шунта:

$$U_{\text{фд}} = K_{\text{фд}} \cdot \cos \varphi. \quad (11)$$

Данный электрический сигнал подается на первый вход аналогового перемножителя сигналов 6. Кроме того, напряжение с обмотки ЭД подается на амплитудный детектор 4, которым преобразуется в электрический сигнал, пропорциональный амплитуде этого напряжения:

$$U_{2\text{ад}} = K_{2\text{ад}} \cdot U_{m \text{ OC}}, \quad (12)$$

который в дальнейшем поступает на второй вход аналогового перемножителя сигналов 6.

На выходе блока 6, в результате перемножения электрических сигналов с блоков 5 и 4, формируется электрический сигнал, величина которого пропорциональна амплитудному значению напряжения на активном сопротивлении обмотки ЭД:

$$U_{1\text{дс}} = K_{1\text{дс}} \cdot U_{m R}. \quad (13)$$

Блоком 7 реализуется процедура аналогового вычисления отношения сигнала с блока 6 к сигналу с блока 3. В результате этого получается сигнал, соответствующий текущей величине активного сопротивления обмотки 2:

$$U_{2\text{дс}} = K_{2\text{дс}} \cdot U_{m R} / I_{m \text{ Ш}} = K_{12\text{дс}} \cdot R. \quad (14)$$

На выходе блока 7 формируется диагностический сигнал, соответствующий величине температуры обмотки 2. Величина текущего нагрева обмотки 2 выводится в качестве диагностической контрольной информации на блок 8 регистрации температуры обмотки 2. Когда этот сигнал достигает или превышает предписанный верхний предел значения температуры, допустимый по условиям нагрева, на выходе элемента 8 появляется управляющий сигнал. Этот сигнал подается на соответствующий исполнительный элемент, осуществляющий режим тепловой защиты.

В свою очередь, тепловая защита может осуществляться как в режиме отключения ЭД, так и в режиме контрольной сигнализации. В первом случае при недопустимом отклонении режимных параметров происходит отключение ЭД от сети, а во

втором – подается звуковой или световой сигнал обслуживающему персоналу о недопустимом отклонении параметров, и он уже принимает решение о необходимости отключения ЭД.

В частности, для медного обмоточного провода сопротивление увеличивается с ростом температуры по линейной зависимости. В качестве примера на рис. 6 представлена зависимость сопротивления меди, являющейся материалом обмоточного провода, от температуры.

Для определения превышения температуры обмотки  $\gamma_{Г/Х}$  над температурой холодной обмотки  $\Theta_X$ , связанного с применением метода сопротивления, использовалось следующее выражение:

$$\gamma_{Г/Х} = (R_{Г} / R_{Х} - 1)(235 + \Theta_X), \quad (15)$$

где  $R_{Г}$  – сопротивление нагретой обмотки;  $R_{Х}$  – сопротивление обмотки в холодном состоянии.

В сущности, работа предлагаемого устройства основана на том, что любая обмотка может рассматриваться как интегрирующий термометр сопротивления, поскольку удельное сопротивление материала провода обмотки имеет соответствующую функциональную зависимость от температуры. Именно это свойство, выраженное в явной зависимости активного сопротивления обмотки от ее средней температуры, и реализует устройство, контролируя нагрев обмотки по текущему значению этого сопротивления.

Поскольку использование предложенного устройства снижает погрешности измерения температуры обмоток электрических машин переменного тока за счет информационной избыточности и алгоритмизации обработки измерительной информации, то это позволяет организовать соответствующий оперативный автоматический мониторинг за техническим состоянием электрооборудования и тем самым улучшить один из главных критериев их качества – эксплуатационную надежность. При этом оперативная техническая диагностика производится на работающем оборудовании, без отключения питания и/или снятия нагрузки, что имеет принципиальное значение для обеспечения надежности функционирования электрооборудования.

#### Экспериментальная проверка разработанного устройства

Схемотехническая реализация предлагаемого устройства была физически смоделирована на базе системы сбора данных E502 производства «ЛКард», которая 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. Пределы преобразования входных величин ЦАП и АЦП задавались программно, а процесс обработки экспериментальных

данных и контроля температуры осуществлялся по соответствующим алгоритмам.

Эксперимент проводился с применением двух одинаковых асинхронных ЭД, которые находились в одной и той же внешней среде с изменяющейся по определенной программе температурой. Температура перегрева обмотки статора каждого электродвигателя измерялась посредством предлагаемого способа термоконтроля, а температура перегрева обмотки одного из них (контрольного) дополнительно фиксировалась методом заложенных термопреобразователей. Система сбора данных E502 в течение всего эксперимента использовалась в термостатированном варианте. По сравнительной оценке результатов измерений температур перегрева каждого из двигателей определялась эффективность нового способа термоконтроля. Следует отметить, что для аналогового варианта все функциональные узлы структурной блок-схемы были реализованы посредством специализированных интегральных множителей K525PC2A.

Проведенные на базе системы сбора данных E502 стендовые испытания функционирования структурной блок-схемы устройства оперативного контроля температуры обмотки и тепловой защиты ЭД подтвердили корректность и эффективность предложенного схемотехнического решения и высокую точность измерения температуры, которая в диапазоне от 25 до 150 °С составляла  $\pm 0,2$  °С. При этом получено, что введение в цепь испытуемых электродвигателей устройств контроля температуры обмотки не вносило искажений в режим их работы.

Таким образом, предложенное устройство обеспечивает высокую точность контроля нагрева обмотки электрической машины при упрощении самой процедуры его расчета. Тем самым повышается точность и надежность тепловой защиты, а также срок службы оборудования в целом.

Предложенное устройство с успехом может быть использовано не только для контроля нагрева обмоток и тепловой защиты ЭМ, но и для других электротехнических устройств, обмотки которых питаются от сети переменного напряжения.

#### Литература

1. ГОСТ 11828–86. Машины электрические вращающиеся. Общие методы испытаний. – М.: Изд-во стандартов, 2003. – 31 с.
2. ГОСТ 27222–91. Машины электрические вращающиеся. Измерение сопротивления обмоток машин переменного тока без отключения от сети. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 20 с.
3. Достов, Л.И. Состояние и перспективы развития средств измерения температуры обмоток электрических машин в рабочих режимах / Л.И. Достов // Электротехническая промышленность. Сер. 01. Электр. машины: Обзор. информ. – 1990. – Вып. 30. – 44 с.

4. Пат. 2035706 Российская Федерация, МПК G01K13/08. Устройство для измерения превышения температуры обмоток электрической машины переменного тока под нагрузкой / Д.Я. Носырев, А.В. Махалов; заявитель и патентообладатель Самарский институт инженеров железнодорожного транспорта им. М.Т. Елизарова. – № 5000585/10; заявл. 09.07.1991; опубл. 20.05.1995, Бюл. № 13. – 3 с.
5. А. с. 998873 СССР, МКИ G01K7/16. Устройство для измерения температуры обмотки электрической машины / И.В. Бочкарев, А.В. Ашмарин. – № 3341761; заявл. 15.09.81; опубл. 23.02.83, Бюл. № 7. – 3 с.: ил.
6. А. с. 1108337 СССР, МКИ G01K7/16, G01R27/08. Устройство для измерения температуры обмотки электрической машины переменного тока под нагрузкой / И.В. Бочкарев, А.В. Ашмарин. – № 3356792; заявл. 23.11.81; опубл. 15.08.84, Бюл. № 30. – 4 с.: ил.
7. Бочкарев, И.В. Измерения температуры обмотки электрической машины переменного тока под нагрузкой / И.В. Бочкарев // *Russian Electric Engineering*. – New York, Allerton Press, Inc. – 1999. – Вып. 70, № 2. – С. 28–32.
8. Власов, А.Б. Модели и методы термографической диагностики объектов энергетики / А.Б. Власов. – М.: Колос, 2006. – 280 с.
9. Бажанов, С.А. Инфракрасная диагностика электрооборудования распределительных устройств / С.А. Бажанов. – М.: НТФ «Электропрогресс», 2000. – 76 с.
10. Бажанов, С.А. Тепловизионный контроль электрооборудования в эксплуатации: в 2 ч. / С.А. Бажанов. – М.: Энергопрогресс, 2005. – Ч. 2. – 64 с.
11. Мухин, Е.А. Методика расчета температуры обмоток электрической машины на основе количественной термографии / Е.А. Мухин, А.Б. Власов // *Вестник МГТУ: тр. Мурман. гос. техн. ун-та*. – 2011. – Т. 14, № 4. – С. 671–680.
12. Мухин, Е.А. Тепловой анализ электрической машины на основе тепловизионной диагностики / Е.А. Мухин, А.Б. Власов // *Эксплуатация морского транспорта*. – 2012. – № 1 (67). – С. 54–58.
13. Овчаров, В.В. Эксплуатационные режимы работы и непрерывная диагностика электрических машин в сельскохозяйственном производстве / В.В. Овчаров. – Киев: Изд-во УСХА, 1990. – 168 с.
14. Бухгольц, Ю.Г. Основы аэродинамических и тепловых расчетов в электромеханике / Ю.Г. Бухгольц, В.А. Тюков, Т.В. Честюнина. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2008. – 201 с.
15. Сипайлов, А.Г. Тепловые, гидравлические и аэродинамические расчеты в электрических машинах / А.Г. Сипайлов, Д.И. Санников, В.А. Жадан. – М.: Высш. шк., 1989. – 238 с.
16. Беспалов, В.Я. Упрощенная математическая модель нестационарного нагрева и охлаждения обмотки статора асинхронного двигателя / В.Я. Беспалов, Ю.А. Моцинский, В.И. Цуканов // *Электричество*. – 2003. – № 4. – С. 20–26.
17. Пат. 2227354 Российская Федерация, МПК H02H5/04, H02H7/06. Способ тепловой защиты двигателя и устройство для его осуществления / Г.А. Бугаев, Ю.В. Ерохин, А.Н. Леонтьев, М.А. Шамис; заявитель и патентообладатель Открытое акционерное общество «Всероссийский научно-исследовательский проектно-конструкторский и технологический институт релестроения с опытным производством». – № 2002108251/09; заявл. 01.04.2002; опубл. 20.04.2004, Бюл. № 11. – 5 с.
18. Пат. 2586110 Российская Федерация, МПК H02H5/04, H02H6/00. Способ защиты электроустановки от перегрева / А.В. Булычев, Н.С. Ефимов, В.Н. Козлов; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «НПП Бреслер». – № 2015113351/07; заявл. 10.04.2015; опубл. 10.06.2016, Бюл. № 16. – 6 с.
19. Бочкарев, И.В. Разработка устройства температурной защиты электрических машин переменного тока / И.В. Бочкарев // *Проблемы автоматизации и управления: Научно-техн. журнал / НАН КР*. – Бишкек: Илим. – 2016. – № 2 (31). – С. 84–88.
20. Брякин, И.В. Диагностика параметров электрических машин переменного тока / И.В. Брякин, И.В. Бочкарев, К.К. Келебаев // *Электротехнические системы и комплексы*. – 2017. – № 4 (37). – С. 38–44. DOI: 10.18503/2311-8318-2017-4(37)-38-44
21. Брякин, И.В. Метод адаптивной редукации / И.В. Брякин // *Проблемы автоматизации и управления*. – Бишкек: Илим. – 2014. – № 1 (26). – С. 134–143.

**Брякин Иван Васильевич**, д-р техн. наук, профессор, директор, Институт автоматизации и информационных технологий НАН КР, г. Бишкек, Кыргызская республика; bivas2006@yandex.ru.

**Бочкарев Игорь Викторович**, д-р техн. наук, профессор, кафедра «Электромеханика», Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, г. Бишкек, Кыргызская республика; elmech@mail.ru.

**Багиев Хусейн Гуйлинович**, аспирант, кафедра «Электромеханика», Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, г. Бишкек, Кыргызская республика; huse\_1995@mail.ru.

**Келебаев Касымбек Кенешович**, директор, Бишкекский технический колледж, г. Бишкек, Кыргызская республика; mskkkk@mail.ru.

Поступила в редакцию 21 января 2019 г.

## ELECTRIC AC MACHINES TEMPERATURE CONTROL AND OVERHEATING PROTECTION

I.V. Bryakin<sup>1</sup>, *bivas2006@yandex.ru*,  
I.V. Bochkarev<sup>2</sup>, *elmech@mail.ru*,  
H.G. Bagiyev<sup>2</sup>, *huse\_1995@mail.ru*,  
K.K. Kelebaev<sup>3</sup>, *msskkk@mail.ru*

<sup>1</sup> Institute of Automation and Information Technologies, National Academy of Sciences  
of the Kyrgyz Republic, Bishkek, Kyrgyz Republic,

<sup>2</sup> Kyrgyz State Technical University after I. Razzakov, Bishkek, Kyrgyz Republic,

<sup>3</sup> Bishkek Technical College, Bishkek, Kyrgyz Republic

The paper reviews and analyzes basic methods of alternating current electric machines (EM) windings temperature control, such as thermometer methods, resistance and embedded thermocouples set out by GOST 11828–86. It also reviews indirect control methods based on the direct measurement of other physical quantities functionally related to the desired value, and computational control methods, based on mathematical modeling of the unit heating process using thermal equivalent circuits. The paper shows that the most appropriate EM winding temperature control method is the resistance method based on the principle of the conductor resistance – temperature dependence, which uses the EM winding as a thermal sensor. However, the EM windings thermal control problem has not been fully resolved and requires new principles for the construction of operational heating control systems. The paper suggests new method of the in-operation EM windings heating control, which does not require disconnecting from the network or disrupt the normal mode of operation. The method is based on the use of phase relationships between measured values as an additional informative parameter. The physical effects underlying this method are analyzed, the necessary operational implementation procedure is described. It is shown that the proposed temperature control method may serve as a convenient basis to build a thermal protection system, which can be in use both in the EM shutdown and in the control signaling modes. The paper also presents the results of the experimental test of the device based on the suggested method.

*Keywords:* electric AC machines, thermal control, winding temperature control methods, thermal sensor, amplitude detector, phase detector, analog multiplier of two signals, analog divider of two signals.

### References

1. GOST 11828–86. *Mashiny elektricheskoye vrashchayushchiyesya. Obshchiye metody ispytaniy* [State Standard 11828–86. Rotary Electric Machines. General Test Methods]. Moscow, Standartinform Publ., 2003. 31 p.
2. GOST 27222–91. *Mashiny elektricheskoye vrashchayushchiyesya. Izmereniye soprotivleniya obmotok mashin peremennogo toka bez otklyucheniya ot seti* [State Standard 27222–91. Rotary Electric Machines. Measuring the Resistance of Windings of AC Machines without Disconnecting from the Network]. Moscow, Standartinform Publ., 1991. 20 p.
3. Dostov L.I. [The State and Prospects of Development of Measuring the Temperature of Windings of Electrical Machines in Operating Modes]. *Electrotechnical industry. Ser. 01. Electr. Machines: Overview. Inform*, 1990, vol. 30. 44 p. (in Russ.)
4. Nosyrev D.Ya., Makhlov A.V. *Ustroystvo dlya izmereniya prevysheniya temperatury obmotok elektricheskoy mashiny peremennogo toka pod nagruzkoy* [Device for Measuring the Temperature Rise of the Windings of an AC Electrical Machine under Load]. Patent RF 2035706, no. 5000585/10; decl. 09.07.1991; publ. 20.05.1995, Bul. no. 13. 3 p.
5. Bochkarev I.V., Ashmarin A.V. *Ustroystvo dlya izmereniya temperatury obmotki elektricheskoy mashiny* [Device for Measuring the Temperature of the Winding of an Electric Machine]. Patent USSR, no. 99887, 1981.
6. Bochkarev I.V., Ashmarin A.V. *Ustroystvo dlya izmereniya temperatury obmotki elektricheskoy mashiny peremennogo toka pod nagruzkoy* [Device for Measuring the Winding Temperature of an AC Electrical Machine under Load]. Patent USSR, no. 1108337, 1984.
7. Bochkarev I.V. [Measuring the Winding Temperature of AC Machines under Load]. *Russian Electric Engineering*, 1999, vol. 70, no. 2, pp. 28–32.
8. Vlasov A.B. *Modeli i metody termograficheskoy diagnostiki ob"yektov energetiki* [Models and Methods of Thermographic Diagnostics of Power Facilities]. Moscow, Kolos, 2006. 280 p.
9. Bazhanov S.A. *Infrakrasnaya diagnostika elektrooborudovaniya raspredelitel'nykh ustroystv* [Infrared Diagnostics of Electrical Equipment Switchgear]. Moscow, NTF "Elektroprogress", 2000. 76 p.

10. Bazhanov S.A. *Teplovizionnyy kontrol' elektrooborudovaniya v ekspluatatsii. Chast' 2* [Thermal Control of Electrical Equipment in Operation. Part 2]. Moscow, Energoproggress, 2005. 64 p.
11. Mukhin E.A., Vlasov A. B. [The Method of Calculating the Temperature of the Windings of an Electric Machine Based on Quantitative Thermography]. *Bulletin of MSTU: the works of Murmansk State Technical University*, 2011, vol. 14, no. 4, pp. 671–680. (in Russ.)
12. Mukhin E.A., Vlasov A. B. [Thermal Analysis of an Electrical Machine Based on Thermal Imaging]. *Operation of Sea Transport*, 2012, no. 1 (67), pp. 54–58. (in Russ.)
13. Ovcharov V.V. *Ekspluatatsionnyye rezhimy raboty i nepreryvnaya diagno-stika elektricheskikh mashin v sel'skokhozyaystvennom proizvodstve* [Operational Operating Modes and Continuous Diagnostics of Electrical Machines in Agricultural Production]. Kiev, USHA Publishing House, 1990. 168 p.
14. Bukhgolts Yu.G., Tyukov V. A., Chestyunina T. V. *Osnovy aerodinamicheskikh i teplovykh raschetov v elektromekhanike* [Fundamentals of Aerodynamic and Thermal Calculations in Electrical Engineering]. Novosibirsk, NSTU Publishing House, 2008. 201 p.
15. Sipailov A.G., Sannikov D.I., Zhadan V.A. *Teplovyye, gidravlicheskiye i aerodinamicheskiye raschety v elektricheskikh mashinakh* [Thermal, Hydraulic and Aerodynamic Calculations in Electrical Machines]. Moscow, High school, 1989. 238 p.
16. Bepalov V.Ya., Moschinsky Yu.A., Tsukanov V.I. [Simplified Mathematical Model of Non-Stationary Heating and Cooling of the Stator Winding of an Induction Motor]. *Elektrichestvo* [Electricity], 2003, no. 4, pp. 20–26. (in Russ.)
17. Bugaev G.A., Erokhin Yu.V., Leontyev A.N., Shamis M.A. *Sposob teplovoy zashchity dvigatelya i ustroystvo dlya yego osushchestvleniya* [The Method of Thermal Protection of the Engine and Device for Its Implementation]. Patent RF 2227354, no. 2002108251/09; decl. 01.04.2002; publ. 20.04.2004, Bul. no. 11. 5 p.
18. Bulychev A.V., Efimov N.S., Kozlov V.N. *Sposob zashchity elektroustanovki ot peregreva* [Method of Protecting Electrical Installations from Overheating]. Patent RF 2586110, no. 2015113351/07; decl. 10.04.2015; publ. 10.06.2016, Bul. no. 16. 6 p.
19. Bochkarev I.V. [Development of the Device for Temperature Protection of AC Electrical Machines]. *Problemy avtomatiki i upravleniya: nauchno-tekhnicheskyy zhurnal, NAN KR. Bishkek: Ilim* [Problems of Automation and Control: Scientific and Technical Journal, NAS KR. Bishkek: Ilim.], 2016, no. 2(31), pp. 84–88. (in Russ.)
20. Bryakin I.V., Bochkarev I.V., Kelebaev K.K. [Diagnostics of Parameters of Electric Machines of Alternating Current]. *Elektrotekhnicheskiye sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2017, no. 4 (37), pp. 38–44. (in Russ.) DOI: 10.18503/2311-8318-2017-4(37)-38-44
21. Bryakin I.V. [Adaptive Reduction Method]. *Problemy avtomatiki i upravleniya: nauchno-tekhnicheskyy zhurnal, NAN KR. Bishkek: Ilim* [Problems of Automation and Control: Scientific and Technical Journal, NAS KR. Bishkek: Ilim.], 2014, no. 1 (26), pp. 134–143. (in Russ.)

*Received 21 January 2019*

---

### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

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. DOI: 10.14529/power190109

### FOR CITATION

Bryakin I.V., Bochkarev I.V., Bagiyev H.G., Kelebaev K.K. Electric AC Machines Temperature Control and Overheating Protection Using Leakage Currents to Evaluate the Induction Motor Insulation Condition. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2019, vol. 19, no. 1, pp. 75–84. (in Russ.) DOI: 10.14529/power190109