

**ДИАГНОСТИКА ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН
СИЛОВОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ТЭС**

Бочкарев Игорь Викторович, д.т.н, профессор, КГТУ им И. Раззакова, Кыргызстан, 720044, г. Бишкек, пр. Ч. Айтматова, 66. Тел.: 0555-09-07-51, e-mail: elmech@mail.ru, orcid.org/0000-0002-9873-9203

Галбаев Жалалидин Токтобаевич, д.т.н, профессор, КГТУ им И. Раззакова, Кыргызстан, 720044, г. Бишкек, пр. Ч. Айтматова, 66. Тел.: 0557-10-15-56, e-mail: jalal1603@mail.ru, orcid.org/0000-0002-9460-2242

Келебаев Касымбек Кенешович, Бишкекский технический колледж, Кыргызстан, 720001, г. Бишкек, Чуй пр.126. Тел.: 0770-82-00-00, e-mail: mskkkk@mail.ru, orcid.org/0000-0002-8930-2379

Аннотация. Рассмотрены вопросы диагностики теплового состояния электрических машин переменного тока непосредственно в эксплуатационных режимах работы без их отключения от сети. Предложены новые способы ввода измерительного постоянного тока в цепь переменного рабочего тока, разработаны конструкции устройств, реализующие эти способы. Предложена методика расчета и выбора значений параметров элементов, входящих в измерительную систему, которая позволяет практически исключить влияние измерительного устройства на режим работы электрооборудования. Показано, что разработанные устройства могут быть использованы не только для контроля нагрева обмоток электрических машин, но и для других электротехнических устройств, питающихся от сети переменного напряжения.

Ключевые слова: электрическая машина переменного тока, измерение температуры, источник постоянного тока, измерительный шунт, полуволны переменного напряжения

DIAGNOSTICS OF THERMAL CONDITION ELECTRIC POWER MACHINES ELECTRICAL EQUIPMENT TPP

Bochkarev Igor Viktorovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, KSTU named after I.Razzakova, Kyrgyzstan, 720044, Bishkek, Ch. Aitmatova Ave., 66. Phone: 0555-09-07-51, e-mail: elmech@mail.ru orcid.org/0000-0002-9873-9203

Galbaev Jalalidin Toktobaevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, KSTU named after I.Razzakova, Kyrgyzstan, 720044, Bishkek, Aytmatov Avenue, 66. Phone: 0557-10-15-56, e-mail: jalal1603@mail.ru orcid.org/0000-0002-9460-2242

Kelebaev Kasymbek Keneshovich, Bishkek Technical College, Kyrgyzstan, 720001, Bishkek, Chui pr.126. Phone: 0770-82-00-00, e-mail: mskkkk@mail.ru orcid.org/0000-0002-8930-2379

Abstract. The problems of diagnostics of the thermal state of electric machines of alternating current are considered directly in operational modes of operation without their disconnection from the network. New ways of introducing a measuring direct current into the circuit of an alternating operating current are proposed, and device designs that realize these methods are developed. A technique for calculating and selecting the values of the parameters of the elements entering the measuring system is proposed, which makes it possible to practically exclude the influence of the measuring device on the operating mode of the electrical equipment. It is shown that the developed devices can be successfully used not only to control the heating of windings of electrical machines, but also for other electrical devices that are powered by an AC voltage network.

Keywords: AC electric machine, temperature measurement, constant current source, measuring shunt, half-wave of alternating voltage

Введение. В качестве приводных двигателей силового электрооборудования ТЭС в подавляющем большинстве случаев применяются электрические машины переменного тока, в основном, асинхронные двигатели (АД). Такое оборудование зачастую работает круглосуточно, причем в переменных режимах, например, различные турбомеханизмы (центробежные насосы, вентиляторы, компрессоры, дымососы и др.). Очевидно, что для нормального функционирования указанного оборудования обязательным условием является надежная работа их приводного АД, которая и определяет надежность всей системы в целом. Это обуславливает необходимость проведения диагностики АД с целью своевременного обнаружения и последующего исключения аварийной работы АД [1, 2, 3].

Известно, что при работе электрической машины выделяется тепло, пропорциональное потерям энергии в ней, что приводит к нагреву отдельных частей

машины. При этом именно нагрев обмоток объективно характеризует режим нагрузки, а также состояние машины с точки зрения качества выполнения ее основных узлов, качества сборки, работы системы вентиляции и т.п. Повышение температуры приводит к интенсивному старению изоляции обмоток, т.е. к снижению ее электрической и механической прочности, что, в конечном счете, приводит к появлению тяжёлых аварийных режимов [4, 5]. Конечно, для надежной работы машины обязательным условием является их эксплуатация в заданных режимах работы. Но на практике реальные условия эксплуатации бывают далеки от нормируемых. Это может быть вызвано разными причинами: искажением питающего напряжения за счет наличия несимметричной нагрузки, нарушением правил технической эксплуатации, изменениями условий окружающей среды, например, повышенная влажность воздуха или наличие агрессивной среды, ухудшением условий охлаждения вследствие загрязнения вентиляционных каналов или поломки охлаждающего вентилятора и т.п. Поэтому нагрев служит одним из основных показателей, характеризующих надежность и срок службы машины.

Постановка задачи. Одним из эффективных способов диагностики АД и повышения тем самым показателей надежности силового электрооборудования ТЭС является разработка новых способов и устройств контроля температуры обмоток АД. Это обеспечит исключение аварийных ситуаций и позволит создавать на их базе автоматическую систему защиты от тепловой перегрузки асинхронных электродвигателей [6, 7].

Очевидно, что тепловой контроль необходимо проводить в течение всего жизненного цикла АД и выполнять диагностические процедуры без отключения АД от питания непосредственно в рабочих режимах без вывода приводного электрооборудования из эксплуатации. Это особенно важно для турбомеханизмов ТЭС, поскольку исключение их из технологического цикла работы ТЭС недопустимо.

Все методы измерения температуры обмоток машин переменного тока делятся на два класса: контактные методы с помощью различных термодатчиков (термопар, термометров сопротивления и т.п.) и методы определения температуры обмотки по её электрическому сопротивлению. Контактные методы для контроля серийных машин непригодны, т.к. установка термодатчиков может быть выполнена только на стадии изготовления машины, например, путем их установки в пазовую часть обмотки, что, в свою очередь, требует увеличения активного объема и габаритов машины.

Метод определения температуры обмотки статора по её электрическому сопротивлению может быть осуществлен или с отключением машины от питания [8, 9], или без отключения питания на основе непрерывного измерения параметров состояния текущего режима путем введения в рабочий переменный ток измерительного постоянного тока [10]. Очевидно, что для диагностики электрооборудования ТЭС необходимо использовать второй способ.

Полученные результаты. Измерение температуры обмотки статора без отключения АД от сети является достаточно сложной задачей. Это обусловлено тем, что обмотка, которая в данном случае используется в качестве интегрирующего термометра сопротивления, активное сопротивление r_{IG} которого зависит от ее средней температуры, находится под переменным напряжением. В сущности, сам процесс измерения состоит из двух операций:

- ввод в цепь обмотки измерительного постоянного тока;
- измерение величины этого измерительного тока и падения напряжения от него на обмотке с последующим расчетом активного сопротивления.

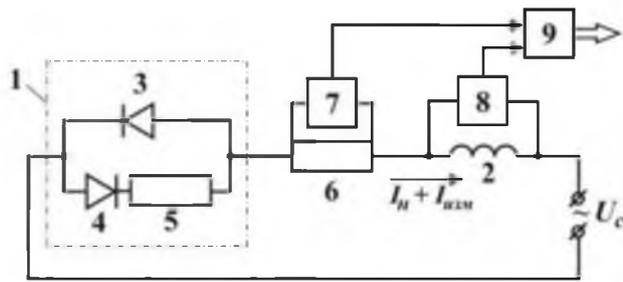


Рис. 1. Принципиальная блок-схема устройства измерения с формированием измерительного постоянного тока из рабочего переменного тока

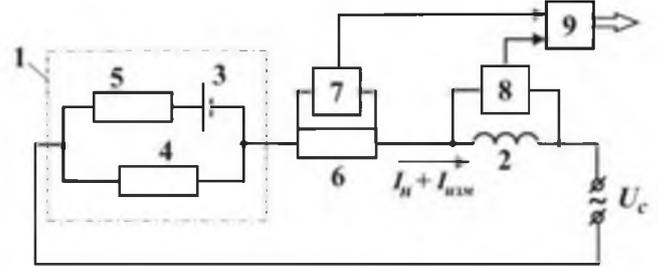


Рис. 2. Принципиальная блок-схема устройства измерения с дополнительным источником постоянного тока

Сложность практической реализации обеих измерительных операций заключается в том, что для защиты оперативного источника постоянного измерительного тока и измерительной цепи в соответствии с [10] необходимо использовать специальные фильтры. С одной стороны, это усложняет измерительное устройство в целом. С другой стороны, любой фильтр может обеспечить полное разделение цепи оперативного источника от цепи переменного тока только при фиксированных параметрах последней. На практике в электрической сети имеются искажения, которые непостоянны и носят случайный характер, например, вследствие несимметричных или ударных нагрузок. Сказанное относится и к фильтру, установленному в цепи измерения падения напряжения на обмотке от измерительного постоянного тока. Таким образом, фильтры не могут в полном объеме обеспечить защиту цепи оперативного источника и измерительной цепи, что приводит к снижению точности измерений и надежности работы всей системы в целом. Для ликвидации указанных недостатков разработаны оригинальные конструкции устройств измерения температуры обмоток АД под нагрузкой без отключения от сети. Принципиальные блок-схемы этих устройств приведены на рис. 1 и 2.

Устройства содержат блок 1 ввода измерительного постоянного тока, который подключен последовательно с обмоткой 2 статора АД, которая играет роль термодатчика. Блок 1 ввода измерительного постоянного тока разработан в двух вариантах. Измерительный постоянный ток $I_{изм}$ может быть или сформирован из рабочего переменного тока в соответствии со схемой, приведенной на рис.1, или введен при помощи дополнительного оперативного источника 3, включенного по схеме рис.2. В первом случае наличие постоянного тока $I_{изм}$ объясняется следующим. Как известно, наличие постоянной составляющей в цепи переменного тока приводит к неравенству площадей полувольт различной полярности этого переменного тока. Именно этот эффект и реализует предложенная схема блока 1 на рис.1. Одна из полувольт номинального переменного тока I_n проходит по цепи диода 3, а вторая – по цепи из последовательно соединенных диода 4 и резистора 5. За счет наличия резистора 5 обеспечивается неравенство площадей полувольт тока. Таким образом, изменяя величину сопротивления резистора 5 можно регулировать численное значение постоянного тока $I_{изм}$, которое в соответствии с требованиями, приведенными в [10], не должно превышать 0,5% от величины номинального переменного тока I_n . Это требование вводится для того, чтобы измерительная схема не вносила ощутимые изменения в режим работы АД. Таким образом, по обмотке 2 и измерительному шунту 6 протекает ток, который имеет как переменную, так и постоянную составляющие ($I_n + I_{изм}$). Последовательно обмотке 2 АД включен измерительный шунт 6, параллельно которому подключен блок 7 измерения величины тока $I_{изм}$, а параллельно обмотке 2 подключен блок 8 измерения величины падения напряжения на обмотке 2 от тока $I_{изм}$. Разработанные

конструкции этих измерительных блоков 7 и 8 будут описаны ниже. Выходные сигналы блоков 7 и 8 подаются на управляющий вычислительный блок 9, где алгоритмически определяется перегрев обмотки 2. После завершения вычислительных процедур блок 9 выводит полученную информацию на монитор и/или формирует соответствующие управляющие сигналы, например, на изменение режима работы АД при фиксации недопустимого нагрева обмоток.

Величина сопротивления $R_{обм}$ обмотки статора АД может быть определена по закону Ома по отношению показаний блоков 8 и 7. Перегрев обмотки определяется по величине сопротивления $R_{обм}$ по формуле

$$\Delta t^{\theta} = [(r_{1Г} - r_{1Х}) / r_{1Х}] (K + T_X) + t^{\theta}_X - t^{\theta}_O, \quad (1)$$

где Δt^{θ} – среднее превышение температуры обмотки; $r_{1Х}$ – омическое сопротивление обмотки в "холодном состоянии" при известной температуре t^{θ}_X ; $r_{1Г}$ – омическое сопротивление обмотки в рабочем состоянии при температуре окружающей среды t^{θ}_O при испытаниях; K – коэффициент, численное значение которого зависит от материала обмотки (например, для меди $K = 235$).

Видно, что предложенная схема создания $I_{изм}$ по рис.1 имеет предельно простую конструкцию и такой блок формирования измерительного тока не требует никаких фильтров или схем защиты от рабочего переменного тока I_H . Поэтому его можно рекомендовать для широкого использования. При этом очевидно, что формируемый таким образом постоянный измерительный ток $I_{изм}$ будет иметь пульсирующий характер и, соответственно, с его помощью можно рассчитать активное сопротивление обмотки статора АД, которое незначительно, но будет отличаться от омического сопротивления этой обмотки, которое и следует использовать для расчета нагрева этой обмотки.

Для повышения точности системы измерения ввод постоянного измерительного тока $I_{изм}$ можно осуществить при помощи дополнительного источника 3 постоянного тока, включенного по схеме, изображенной на рис.2. Для защиты этого источника 3 от действия рабочего переменного тока необходимо, чтобы ток по нему протекал в одну сторону. Для этого необходимо выполнить следующее условие (см. рис. 3):

$$I_{=} \geq I_{\sim}, \quad (2)$$

где $I_{=}$ и I_{\sim} – соответственно, постоянный и переменный токи, протекающие по цепи «источник постоянного тока 3, сопротивление R_p резистора 5».

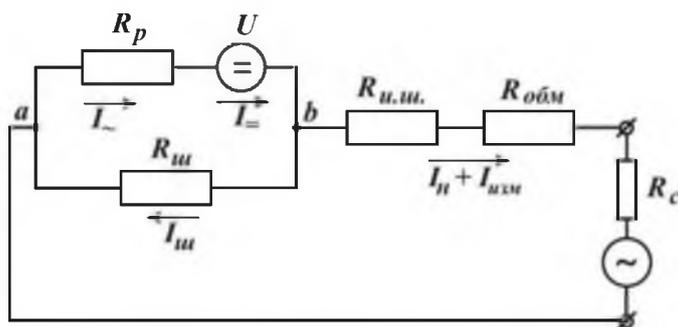


Рис.3. Электрическая схема замещения устройства по рис.2

Определим параметры элементов, входящих в устройство по рис.2, необходимые для выполнения условия (2). Для этого получим аналитические выражения, связывающие токи I_{\sim} и $I_{=}$ с параметрами элементов схемы.

Запишем первый закон Кирхгофа для узла "а" относительно постоянной составляющей тока:

$$I_{=} = I_{изм} + I_{ш}, \quad (3)$$

где $I_{изм}$ и $I_{ш}$ – токи, создаваемые источником 3, и протекающие, соответственно, по обмотке 2 и по шунту 4.

Величину тока $I_{ш}$ определим из выражения для падения постоянного напряжения $U_{ab(пост)}$ на блоке 1 (между точками a и b):

$$U_{ab(пост)} = I_{изм} R_{нагр} = I_{ш} R_{ш}, \quad (4)$$

где $R_{нагр} = R_{и.ш.} + R_{обм} + R_c$ – суммарное сопротивление нагрузки, подключенное к блоку 1; $R_{и.ш.}$, $R_{обм}$, R_c и $R_{ш}$ – соответственно, сопротивления измерительного шунта 6, обмотки 2, питающей сети и шунта 4 постоянному току.

Тогда из (4) получаем

$$I_{ш} = I_{изм} \frac{R_{нагр}}{R_{ш}}. \quad (5)$$

Подставляя (5) в (3), получим

$$I_{-} = I_{изм} \left(1 + \frac{R_{нагр}}{R_{ш}} \right) \quad (6)$$

Величина тока I_{-} , протекающего по цепи "источник 5 – резистор 4" под действием переменного рабочего напряжения, равна

$$I_{-} = \frac{U_{ab(пер)}}{R_p}, \quad (7)$$

где $U_{ab(пер)}$ – падение переменного напряжения на блоке 1.

Для того, чтобы режим и условия работы машины после включения блока 1 практически не изменялись, необходимо выполнить условие

$$U_{ab(пер)} = k U_{ном}, \quad (8)$$

где k – коэффициент, характеризующий падение рабочего напряжения на обмотке при включении блока 1.

Величина указанного коэффициента в соответствие с [10] выбирается из условия

$$k \leq 0,05. \quad (9)$$

Напряжение $U_{ab(пер)}$ в соответствие с рис. 2 равно

$$U_{ab(пер)} = I_{ном} R_{ab}, \quad (10)$$

Тогда из (10) и (8) имеем

$$R_{ab} = \frac{k U_{ном}}{I_{ном}}. \quad (11)$$

Сопротивление можно выразить через параметры схемы рис.2 в следующем виде

$$R_{ab} = \frac{R_p R_{ш}}{R_p + R_{ш}}. \quad (12)$$

Для расчета параметров элементов, входящих в (12), а также для определения требуемой величины напряжения U источника 3 постоянного измерительного тока учтем следующее. Напряжение U источника постоянного тока равно

$$U = I_{изм} R_{нагр} + I_{-} R_p. \quad (13)$$

Тогда с учетом полученных выше выражений получим

$$U = I_{изм} R_{нагр} + I_{изм} \left(1 + \frac{R_{нагр}}{R_{ш}} \right) R_p. \quad (14)$$

На базе совместного решения уравнений (14) (12) и (10) относительно R_p и $R_{ш}$ получим

$$R_p = U / [I_{изм} (1 + R_{нагр} I_{ном} / (k U_{ном}))] \quad (15)$$

$$R_{ш} = U / [U I_{ном} / (k U_{ном}) - I_{изм} (1 + R_{нагр} I_{ном} / (k U_{ном}))]. \quad (16)$$

Из выражения (13) имеем

$$I_{изм} = \frac{(U - I_{изм} R_{нагр})}{R_p} \tag{17}$$

Учитывая выражения (2), (7), (8) и (17), получаем

$$\frac{(U - I_{изм} R_{нагр})}{R_p} \geq \frac{U_{аб(пер)}}{R_p} = \frac{kU_{ном}}{R_p} \tag{18}$$

Следовательно, для выполнения условия (2) напряжение U источника 3 постоянного тока надо выбирать из условия:

$$U \geq k U_{ном} + I_{изм} R_n \tag{19}$$

Таким образом, последовательность расчета параметров элементов блока 3 постоянного измерительного тока следующая:

- выбираем величину коэффициента k из условия $k \leq 0,05$ и величину измерительного постоянного тока $I_{изм}$ из условия $I_{изм} \leq (0,01 \div 0,05) I_{ном}$;
- по уравнению (19) выбираем величину входного напряжения U источника 3;
- по уравнениям (15) и (16) рассчитываем величины сопротивлений резистора R_p и шунта $R_{ш}$.

Все выкладки для наглядности были выполнены для однофазных машин переменного тока. Электрические машины силового электрооборудования ТЭС выполняются трехфазными. Для них расчет также выполняется по приведенной выше методике. Отличия состоят только в формулах для определения сопротивления нагрузки $R_{нагр}$:

- для трехфазных машин с обмотками, соединенными в "звезду"

$$R_{нагр} = 3/2 (R_{обм} + R_c) + R_{изм} \tag{20}$$

- для трехфазных машин с обмотками, соединенными в "треугольник"

$$R_{нагр} = 3 R_{обм} (R_{обм} + R_c) / (3R_{обм} + R_c) + R_{изм} \tag{21}$$

Следует отметить, что, выполнив шунт 4 и резистор 5 регулируемые, можно использовать одно и то же устройства для диагностики большого количества машин с различными параметрами.

В соответствии с рис. 1, 2 для измерения величины тока $I_{изм}$ параллельно измерительному шунту подключен первый измерительный блок 7, а для измерения величины падения напряжения $U_{изм}$ на обмотке от этого тока $I_{изм}$ параллельно обмотке подключен второй измерительный блок 8. Проведенные исследования позволили разработать наиболее рациональную конструкцию этих измерительных блоков, идентичную для обоих блоков. Их принципиальная схема приведена на рис. 4.

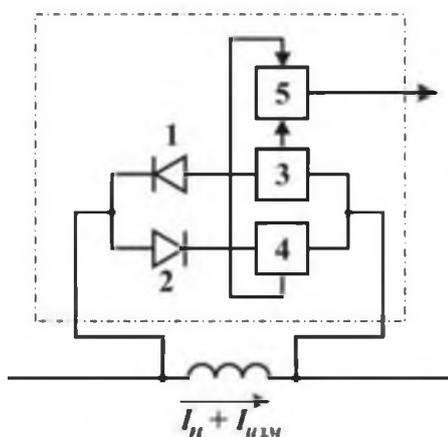


Рис.4. Принципиальная схема измерительного блока

Работу данного измерительного блока покажем на примере измерения величины падения напряжения $U_{изм}$. Падение напряжения на обмотке разделяются диодами 1 и 2 на две полуволны. Измерительные датчики 3 и 4 формируют сигналы, пропорциональные

площадям этих полувольт. Поскольку по обмотке протекает переменный ток, содержащий постоянную составляющую $I_{изм}$, то полувольты падения напряжения на обмотке имеют разную площадь. Выходные сигналы датчиков 3 и 4 подаются на вход сумматора 5, который на своем выходе формирует сигнал, пропорциональный алгебраической сумме входных сигналов, т.е. пропорциональный разнице площадей полувольт. Таким образом, выходной сигнал сумматора 5 представляет собой величину падения напряжения $U_{изм}$ от тока $I_{изм}$.

Принцип работы первого измерительного блока для измерения величины тока $I_{изм}$ аналогичен описанному. Более того, измерение тока $I_{изм}$ можно объединить с его вводом, т.е. на рис. 1 объединить блоки 1 и 7, подключив измерительные датчики блока 7 непосредственно в цепи диодов 3 и 4.

Сформированные таким образом два выходных сигнала, один из которых от блока 8 пропорционален $U_{изм}$, а другой от блока 7 пропорционален $I_{изм}$, подаются на вычислительное устройство 9 (см. рис. 1, 2), которое вычисляет фактическое значение активного сопротивления обмотки $r_{ДГ}$ и затем по формуле (1) определяет перегрев обмотки.

Проведенные экспериментальные исследования с использованием асинхронных трехфазных электродвигателей типа 4А80В2 показали высокую точность диагностики температуры разработанных устройств, полностью удовлетворяющую требованиям, приведенным в [3, 4]. Испытания проводились при различных нагрузках на валу двигателя и, соответственно, при разных температурных режимах.

Выводы. 1. Применение разработанных устройств диагностики теплового состояния электрических машин обеспечивает повышение надежности и срока службы функционирования силового электрооборудования ТЭС. При этом весь процесс измерения легко поддается полной автоматизации при непрерывном получении измерительной информации.

2. Использование предложенной методики расчета и выбора значений параметров элементов, входящих в измерительную систему, включая величину напряжения дополнительного источника измерительного постоянного тока, позволяет практически исключить влияние измерительного устройства на режим работы электрооборудования. Кроме того, это позволяет обеспечить защиту источника постоянного тока от переменного рабочего тока и производить техническую диагностику на работающем оборудовании, без отключения питания и/или снятия нагрузки.

3. Разработанные устройства с успехом могут быть использованы не только для контроля нагрева обмоток электрических машин, но и для других электротехнических устройств, питающихся от сети переменного напряжения.

Список литературы

1. Мусин А.М. Аварийные режимы асинхронных электродвигателей и способы их защиты. – М.: Колос, 1979. – 112 с.
2. Гуревич Э. И. Тепловые испытания и исследования электрических машин – Л.: Энергия. Ленингр. отд-ние, 1977. – 294 с.
3. Гольдберг О. Д. Испытания электрических машин. – М.: Высшая школа, 2000. – 256с.
4. Богаенко И. Н. Контроль температуры электрических машин. – М.: Техника, 1975. – 176 с.
5. Жерве Г. К. Промышленные испытания электрических машин. – М.: Энергия, 1982. – 575 с.
6. Крупенин Н.В., Голубев А.В., Завидей В.И. Новые возможности в диагностике электрических машин // Электричество. – 2011. – № 9. – С. 45–48.
7. Патент РФ № 2455657. Способ теплового контроля температуры обмоток электрических машин. G01R35/00 /Власов А. Б., Мухин Е. А. – Опубл. 10.07.2012.
8. Б. М. Коварский, Ю. И. Янко. Испытание электрических машин. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.

Известия КГТУ им. И.Раззакова 44/2017

9. ГОСТ 7217-87. Машины электрические вращающиеся. Двигатели асинхронные. Методы испытаний. – М.: Издательство стандартов. – 2003. – 41 с.

10. ГОСТ 27222-91. Машины электрические вращающиеся. Измерение сопротивления обмоток машин переменного тока без отключения от сети. – М.: Издательство стандартов. – 1991. – 20 с.