

МОНИТОРИНГ, КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

УДК 621.313.33.043.2.536

[https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-4\(37\)-38-44](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-4(37)-38-44)

Брякин И.В.¹, Бочкарев И.В.², Келебаев К.К.³

¹Институт автоматики и информационных технологий Национальной Академии Наук Кыргызской Республики

²Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова

³Бишкекский технический колледж

ДИАГНОСТИКА ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

В работе представлены результаты исследования, направленные на решение проблемы диагностики технического состояния электрических машин переменного тока непосредственно в эксплуатационных режимах работы без их отключения от сети. Для этой цели предложено использовать электрические параметры обмотки статора, а именно ее активное и индуктивное сопротивление. Показано, что использование этих параметров в качестве источника диагностической информации позволит обеспечить достоверность диагностических оценок, а также проводить цифровую обработку и анализ результатов измерений. Предложен новый способ диагностики, который обеспечивает высокую точность измерений и при этом не требует применения дополнительного оборудования в виде специализированных стендов. В этом способе реализовано селективное преобразование сигналов с периодической весовой функцией, в основе которого лежит применение синхронных детекторов в виде аналоговых умножителей с интегратором или фильтром нижних частот. За счет этого обеспечивается соответствующая фазовая «синхронизация» всех измеряемых комплексных величин по отношению к вектору тока. Доказано, что по результатам алгоритмической обработки трех измерений вырабатывается необходимая диагностическая информация, используя которую можно диагностировать состояние параметров электрической обмотки и магнитопровода ЭМПТ, а также температуру перегрева обмотки. Предложен возможный вариант аппаратной реализации предлагаемого способа диагностики.

Ключевые слова: электрическая машина переменного тока, активное и индуктивное сопротивление обмотки статора, пассивный двухполюсник, векторная диаграмма, измерительный шунт, селективное преобразование сигналов с периодической весовой функцией, синхронный детектор.

ВВЕДЕНИЕ

Электрические машины переменного тока (ЭМПТ) широко используются в различных областях – в промышленности, сельском хозяйстве, транспорте, быту и т.д. Их внезапный выход из строя приводит к значительным экономическим потерям. Следовательно, диагностика с целью определения технического состояния и работоспособности электрической машины – весьма актуальная задача. При этом очевидно, что наиболее целесообразным является проведение диагностики без вывода ЭМПТ из технологического процесса и использования специализированных испытательных стендов, т.е. осуществление всех диагностических процедур непосредственно на работающей машине. Это позволяет не только предотвратить аварийные ситуации, но и дает информацию, необходимую для изменения характера или режимов эксплуатации, а также для проведения конкретных ремонтных процедур, что существенно снижает затраты на эксплуатацию и ремонт машины. Таким образом, своевременный контроль неблагоприятного состояния ЭМПТ позволяет повысить уровень ее эксплуатационной надежности.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Информацию о техническом состоянии электрической машины можно получить различными способами [1-3]. При этом, как показывает анализ литературы, простых и несложных при практической реализации способов диагностики технического состояния ЭМПТ в настоящее время нет. В данной работе предлагается новый способ диагностики, основанный на контроле входных электрических параметров обмотки статора

ЭМПТ, а именно ее активного r_1 и индуктивного x_1 сопротивлений, использование которых в качестве источника диагностической информации позволит обеспечить достоверность диагностических оценок, а также проводить цифровую обработку и анализ результатов измерений. Покажем возможность использования указанных сопротивлений обмотки статора в качестве информативных параметров при диагностике ЭМПТ.

При эксплуатации ЭМПТ одним из основных параметров является температура обмотки статора. Именно термофизические процессы в значительной степени влияют на срок службы и вероятность безотказной работы машины. По величине температуры можно оценить величину нагрузки, эффективность работы системы охлаждения, качество сборки машины и т.п.

Из методов тепловых испытаний электрических машин известен метод определения температуры обмотки статора по ее электрическому сопротивлению, основанный на том, что любая обмотка может рассматриваться как интегрирующий термометр сопротивления, поскольку ее активное сопротивление r_1 зависит от ее средней температуры. На этом свойстве основан широко распространенный метод измерения температуры [4], заключающийся в сравнении омического сопротивления r_{1X} в «холодном состоянии», измеренного при известной температуре T_X , с сопротивлением $r_{1Г}$ в рабочем состоянии и определении перегрева по формуле

$$\Delta T = [(r_{1Г} - r_{1X}) / r_{1X}] (K + T_X) + T_X - T_0, \quad (1)$$

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

Тенденция к максимально возможному использованию машины с точки зрения ее нагрева предполагает необходимость контроля нагрева непосредственно в рабочих режимах без отключения машины от сети путем. Для этого на практике используется способ, основанный на подаче в контролируемую обмотку постоянного измерительного тока, накладываемого на рабочий переменный ток [5-7]. Однако для защиты измерительной схемы от рабочего переменного тока необходимо применение различных фильтров и схем компенсации. Это значительно усложняет устройства диагностики и снижает их надежность и точность измерения. Кроме того, введение постоянного измерительного тока изменяет режим работы ЭМПТ, что ухудшает их качество функционирования и эксплуатационные показатели.

Величина индуктивного x_1 сопротивления обмотки статора зависит от ряда факторов, в том числе от магнитных свойств магнитопровода. При этом известно, что в процессе эксплуатации происходит старение стали вследствие температурных и механических воздействий, которые нарушают доменную структуру стали и увеличивают потери на гистерезис. Особенно сильно магнитные свойства магнитопровода изменяются после ремонта [8]. Это объясняется действием технологических факторов, например повреждением пазовой части магнитопровода при извлечении обмотки, особенно при применении выжигания изоляции при повышенной температуре. Известные способы измерения индуктивного сопротивления обмотки статора ЭМПТ предусматривают вывод машины из эксплуатации и ее испытание на специальном стенде путем регистрации и последующей обработки кривой изменения тока обмотки в переходных режимах работы при включении или отключении напряжения [9, 10].

Таким образом, реализация известных способов диагностики ЭМПТ сложна и не обеспечивает необходимой точности, т.к. требует применения дополнительного оборудования в виде специализированных стендов. Поэтому с целью упрощения процесса диагностики ЭМПТ и послеремонтной оценки их технического состояния был проведен комплекс научно-исследовательских работ, который завершился созданием нового способа и устройства для контроля электрических параметров обмотки статора ЭМПТ.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В общем случае обмотку электродвигателя можно считать пассивной электрической цепью относительно источника энергии. Исходя из этого, ее можно представить в виде пассивного двухполюсника (ПД), показанного на **рис. 1**. Параметром такого ПД является его входное комплексное сопротивление, т.е. комплексное сопротивление между выводами «а» и «b»:

$$\dot{Z}_1 = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = r_1 + jx_1, \tag{2}$$

где $\dot{U} = Ue^{j\psi_u}$ и $\dot{I} = Ie^{j\psi_i}$ – комплексные значения соответственно напряжения и тока цепи; r_1 и x_1 – соответственно активное и реактивное сопротивления обмотки электродвигателя.

Из данного выражения следует, что любой ПД можно представить эквивалентной схемой замещения,

состоящей из последовательного соединения элемента с активным сопротивлением r и элемента с реактивным сопротивлением x .

Полное сопротивление ПД определяется выражением

$$z = \sqrt{r_1^2 + x_1^2}. \tag{3}$$

В зависимости от знака реактивного сопротивления x комплексное сопротивление ПД имеет индуктивный ($x>0$) или емкостной ($x<0$) характер. Для рассматриваемого случая будем считать, что комплексное сопротивление ПД имеет индуктивный характер, т.е. $x>0$.

Для рассматриваемого ПД построим векторную диаграмму, на которой $\dot{U}_a = r_1\dot{I}$ и $\dot{U}_p = jx_1\dot{I}$ – соответственно активная и реактивная составляющие напряжения \dot{U} между выводами ПД (**рис. 2**).

Векторы комплексных напряжений \dot{U}_a, \dot{U}_p и \dot{U} образуют на комплексной плоскости треугольник напряжений (см. **рис. 2**).

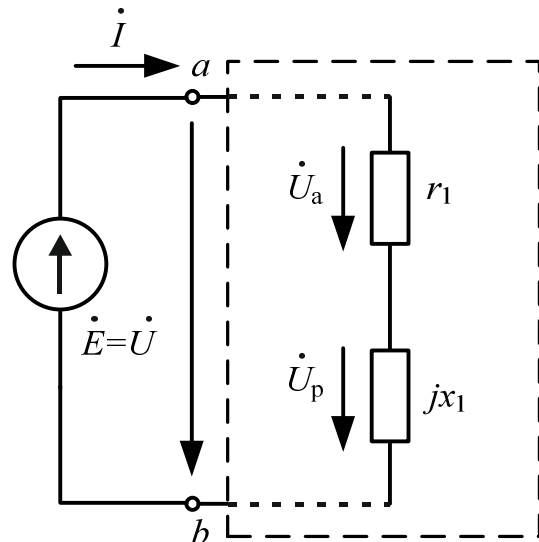


Рис. 1. Схема замещения ЭМПТ в виде пассивного двухполюсника

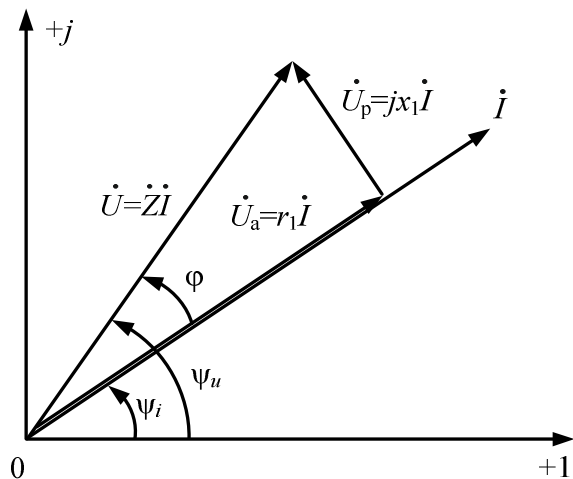


Рис. 2. Векторная диаграмма напряжений и токов электрической цепи ПД

Модуль вектора активной составляющей напряжения $U_a = U \cos \varphi$ и сам вектор совпадает по фазе с вектором тока \dot{I} , где $\varphi = (\psi_U - \psi_I)$ – аргумент комплексного сопротивления.

Модуль вектора реактивной составляющей напряжения $U_p = U |\sin \varphi|$ и сам вектор сдвинут по фазе относительно вектора тока \dot{I} на угол $|\pi/2|$.

$$\dot{U} = \dot{U}_a + \dot{U}_p.$$

В этом случае индуктивное реактивное напряжение опережает по фазе ток \dot{I} на угол $\pi/2$.

Из треугольников напряжений следует, что

$$U = \sqrt{U_a^2 + U_p^2}. \tag{4}$$

Анализ векторной диаграммы напряжений и токов электрической цепи ПД выявил наличие неопределенности в сведениях о свойствах исследуемого объекта (электрические параметры функциональных элементов ЭМПТ). Для решения данной проблемы, т.е. минимизации этой неопределенности, предлагается воспользоваться соответствующими методами повышения точности измерений.

В основном используются методы повышения точности измерений, базирующиеся на структурной избыточности измерительных систем (благодаря комплексированию) или на временной избыточности (повторения измерений во времени) [11]. Следует отметить, что реализация подобных методов предполагает использование дополнительных ресурсов в виде соответствующей аппаратуры или времени.

Существует реальная возможность повышения эффективности данных методов путем дополнения их методом использования функциональных связей между измеряемыми величинами. Для рассматриваемого случая функциональные связи определяются соответствующими фазовыми соотношениями между этими величинами (см. рис. 2). Кроме того, из выражения (4) следует, что структурный метод повышения точности измерений возможно реализовать путем организации двух «асимметричных» измерительных каналов, обладающих линейно независимыми статическими функциями преобразования. В этом случае введение дополнительного измерительного канала на основе измерительного шунта в совокупности с асимметричными измерительными каналами позволит описать измерительный процесс в виде корректно составленной системы математических уравнений, решение которых, в свою очередь, существенно уменьшит фактор неопределенности.

В соответствии с изложенным выше введем между источником энергии и ПД измерительный шунт r_2 , обладающий эталонным активным сопротивлением (рис. 3).

Для дополненной схемы ДП (см. рис. 3) построим соответствующие векторные диаграммы (рис. 4).

В соответствии с рис. 3 и 4 для комплексного сопротивления между выводами «a» и «b» справедливо выражение

$$\dot{Z} = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = r_1 + r_2 + jx_1. \tag{5}$$

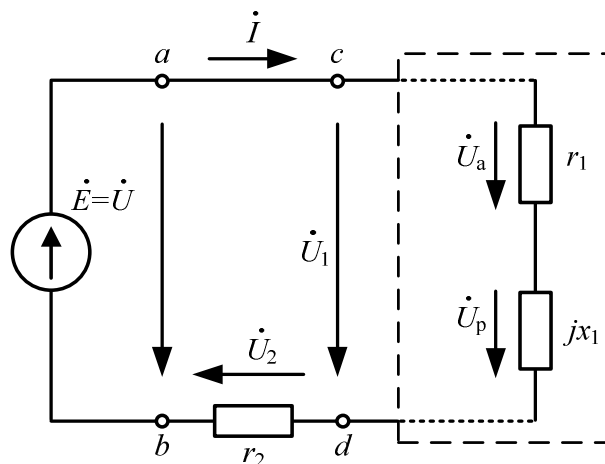


Рис. 3. Схема замещения ЭМПТ с измерительным шунтом

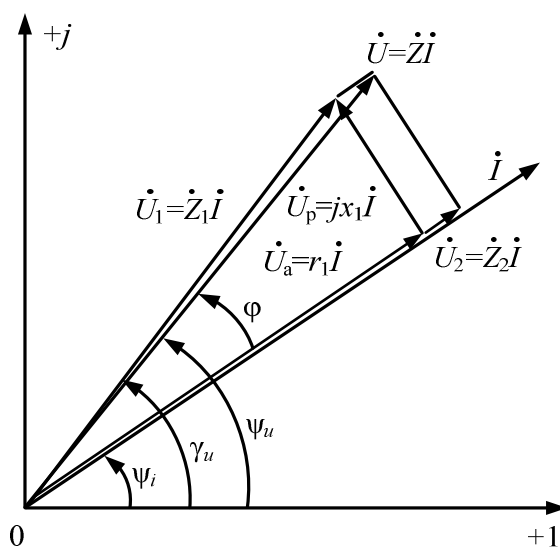


Рис. 4. Векторная диаграмма напряжений и токов электрической цепи ПД при наличии измерительного шунта

Аналогично для комплексного значения напряжения между выводами «a» и «b» можем записать:

$$\dot{U} = \dot{U}_1 + \dot{U}_2, \tag{6}$$

где $\dot{U}_1 = \dot{U}_a + \dot{U}_p$ – комплексное значения напряжения между выводами «c» и «d».

Из анализа векторной диаграммы (см. рис. 3) следует, что введение измерительного шунта между источником энергии и ПД позволяет организовать регистрацию информационных сигналов \dot{U}_1 и \dot{U}_2 соответственно с выводов «c-d» и «b-d». В этом случае мы получаем информационную избыточность, которая имеет потенциальную возможность снижения уровня неопределенности диагностики состояния параметров обмотки электродвигателя.

Для реализации указанной возможности совместим вещественную ось комплексной плоскости с направлением вектора \dot{U}_2 . Результат данной процедуры представлен векторной диаграммой на рис. 5.

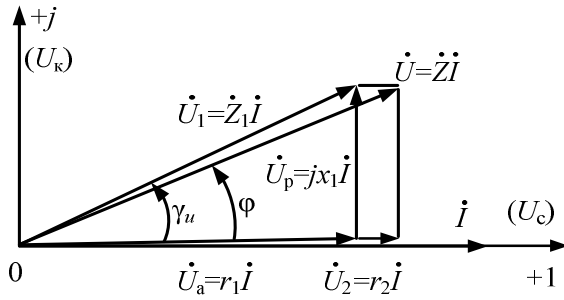


Рис. 5. Векторная диаграмма напряжений и токов электрической цепи ПД при совмещении вещественной оси с направлением вектора напряжения \dot{U}_2 на измерительном шунте

Из рис. 5 видно, что совмещение вещественной оси комплексной плоскости с направлением вектора \dot{U}_2 обеспечивает соответствующую фазовую «синхронизацию» по отношению к вектору \dot{I} всех остальных комплексных величин. Фактически комплексная плоскость становится плоскостью с координатными осями абсцисс « U_c » и ординат « U_k » соответственно для синфазных и квадратурных составляющих комплексной величины напряжения \dot{U}_1 .

Для реализации данной процедуры целесообразно применение селективных измерительных устройств, осуществляющих соответствующее линейное селективное преобразование входного сигнала:

$$y(t) = \int_0^t x(\tau)h(t-\tau)d\tau$$

или

$$y(t) = \int_0^t h(\tau)x(t-\tau)d\tau, \tag{7}$$

где $x(t)$ – входной сигнал; $y(t)$ – выходной сигнал; $h(t, \tau)$ – импульсная реакция, или весовая функция.

Подобное преобразование может быть реализовано следующими способами:

1 – посредством избирательных фильтров, имеющих непериодическую весовую функцию

$$h(\tau) = e^{-\alpha\tau} \sin \omega_0 \tau, \tag{8}$$

где α – коэффициент затухания;

2 – посредством реализации селективного преобразования с периодической весовой функцией.

Исходя из особенностей решаемой задачи, воспользуемся способом реализации селективного преобразования с периодической весовой функцией, в основе которого лежит применение синхронных детекторов (СД), т.е. аналоговых умножителей с интегратором или фильтром нижних частот [12]. Входной сигнал СД умножается на периодическую весовую функцию, формируемую из опорного сигнала. Вариант структурной блок-схемы такого СД представлен на рис. 6.

Здесь $U_c(t, \lambda)$ – информационный сигнал (опорный сигнал), содержащий полезную информацию λ ; $U_m(t)$ – шумовая помеха; $x(t)$ – смешанный сигнал (смесь); ФВФ – формирователь весовой функции; $h(t)$ – периодическая весовая функция; $y(\lambda)$ – выходной сигнал, содержащий полезную информацию λ ; $t \in T$.

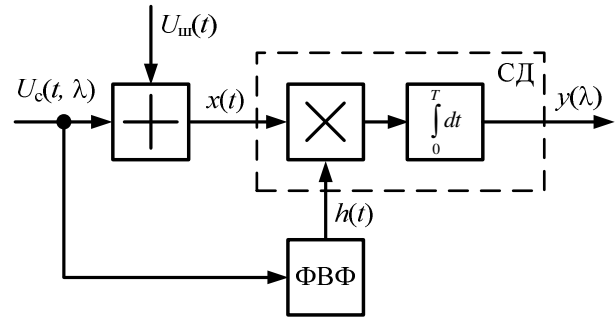


Рис. 6. Структурная блок-схема СД

Следует отметить, что использование СД в измерительных устройствах обеспечивает их высокую избирательность, широкий динамический диапазон входных сигналов, повышенную чувствительность, а также дает возможность измерять фазовый угол исследуемого сигнала относительно опорного. Кроме того, одним из важнейших свойств СД является его способность детектировать слабые сигналы при наличии очень больших помех, т.е. обеспечивать наибольшее отношение «сигнал/шум» на выходе.

В селективных измерительных приборах применяют, как правило, СД на основе параметрических элементов. По виду закона изменения проводимости параметрического элемента большинство таких СД разделяют на две группы: с гармоническим изменением проводимости (СД гармонического типа) и с релейным ее изменением (СД релейного типа). Весовые функции реализуемых селективных преобразований имеют при этом соответственно вид

$$h(\tau) = \frac{1}{kT} \sin \omega_0 \tau \text{ и } h(\tau) = \frac{\pi}{4kT} \operatorname{sgn} \sin \omega_0 \tau, \tag{9}$$

где $k = 1, 2, 3, \dots$; T – интервал определения весовой функции.

Выбор конкретной схемной реализации СД осуществляется с точки зрения соответствия трем требуемым характеристикам: динамическому диапазону, диапазону частот и избирательности.

Известно, что идеальная селекция полезного сигнала достигается только при использовании гармонической весовой функции. В этом случае СД позволяют более точно выделять исследуемый сигнал на фоне как периодических, так и непериодических помех, что существенно повышает точность измерительного преобразования.

Следует отметить, что традиционно квадратурные сигналы получают посредством реализации одного из трех основных методов: 1 – преобразование Гильберта; 2 – задержка сигнала в линии задержки; 3 – фазовое детектирование с использованием сдвинутых по фазе на $\pi/2$ опорных напряжений. В каждом из этих методов в зависимости от степени широкополосности исходного сигнала формирование квадратурного сигнала связано с определенными погрешностями.

Анализ особенностей перечисленных выше методов формирования квадратурных сигналов показал, что для рассматриваемого круга решаемых задач оптимальным является метод фазового детектирования с использованием сдвинутых по фазе на $\pi/2$ опорных напряжений. Структурная блок-схема технической реализации данного метода представлена на рис. 7, где ОГ – опорный генератор; ФВ – фазовращатель на 90° ; СД₁ и СД₂ – син-

хронные детекторы соответствующих измерительных каналов (асимметричных); $y_c(\lambda)$ и $y_k(\lambda)$ – синфазная и квадратурная составляющие информационного сигнала.

При такой интерпретации, в случае аппаратной регистрации информационных сигналов, для соответствующих измерительных каналов ИК₁, ИК₂ и ИК₃ будем иметь:

$U_{ИК_1} = k_1 \dot{U}_1 \cos(\psi_0 - \psi)$ – для синфазной составляющей сигнала \dot{U}_1 ;

$U_{ИК_2} = k_2 \dot{U}_1 \sin(\psi_0 - \psi)$ – для квадратурной составляющей сигнала \dot{U}_1 ;

$$U_{ИК_3} = k_3 U_2,$$

где ψ_0 и ψ – фазы соответственно опорного напряжения СД и комплексной величины \dot{U}_1 ; k_1 и k_2 – коэффициенты статических функций преобразования СД соответственно в ИК₁ и ИК₂; k_3 – коэффициент статической функций преобразования амплитудного детектора в ИК₃; U_2 – модуль векторной величины напряжения \dot{U}_2 .

После соответствующей подстановки окончательно получим

$$U_{ИК_1} = k_1 U_a = k_1 r_1 I, \quad (10)$$

где U_a – модуль активной составляющей векторной величины напряжения \dot{U}_1 , I – модуль векторной величины тока \dot{I} ;

$$U_{ИК_2} = k_2 U_p = k_2 x_1 = k_2 \omega \frac{W^2}{z_M}, \quad (11)$$

где U_p – модуль реактивной составляющей векторной величины напряжения \dot{U}_1 ; ω – циклическая частота источника энергии; W – условное количество витков обмотки электродвигателя; z_M – магнитное сопротивление магнитопровода электродвигателя;

$$U_{ИК_3} = k_3 r_2 I. \quad (12)$$

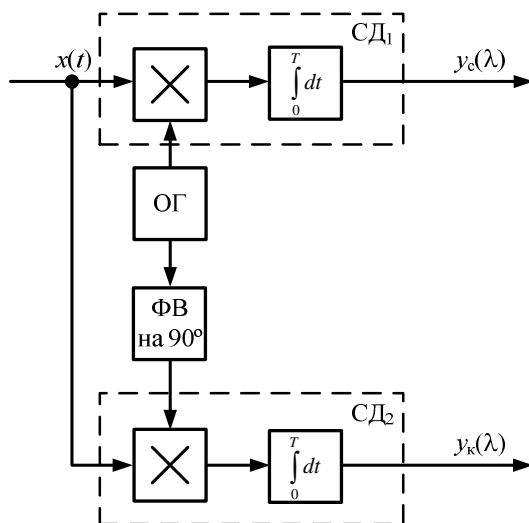


Рис. 7. Блок-схема формирователя квадратурных сигналов

Для основных конструктивных параметров обмотки электродвигателя справедливы следующие соотношения:

$$r_1 = r_{1H} [1 + \alpha(T - T_H)] \text{ и } z_M = \mu \frac{l}{S}, \quad (13)$$

где r_{1H} – номинальное значение активного сопротивления обмотки электродвигателя при номинальной температуре T_H ; α – температурный коэффициент; T – текущая температура обмотки электродвигателя; μ – магнитная проницаемость магнитопровода электродвигателя; l и S – условные длина и площадь сечения магнитопровода электродвигателя,

Анализ выражений (10)-(13), показывает, что, используя результаты измерений $U_{ИК_1}$, $U_{ИК_2}$ и $U_{ИК_3}$, можно определить параметры обмотки, а именно r_1 и z_M и, таким образом, диагностировать состояние электрической обмотки и магнитопровода ЭМПТ, а также температуру его перегрева. Например, по величине z_M из (13) можно определить величину μ , которая изменяется под действием деградиционных процессов в магнитопроводе и, таким образом, диагностировать состояние магнитопровода. При этом следует отметить, что параметры l , S и W относятся к конструктивным параметрам соответствующего типа электродвигателя. Информация о значениях этих параметров может быть взята из соответствующей конструкторской документации на рассматриваемый тип электродвигателя.

Возможный вариант аппаратной реализации предлагаемого способа диагностики представлен на рис. 8. Здесь обозначено: 1 – формирователь опорных напряжений для СД 2 и 3; 4 – амплитудный детектор; 5, 6 и 7 – стробируемые АЦП; 8 – электронно-вычислительный блок; совокупности блоков 2 и 5 образуют ИК₁, блоков 3 и 6 – ИК₂, блоков 4 и 7 – ИК₃.

Гармонический сигнал с выводов «b» и «d» преобразуется амплитудным детектором 4 в электрический сигнал, пропорциональный величине тока в рассматриваемой электрической цепи. В свою очередь, гармонический сигнал с выводов «c» и «d» поступает на входы блоков 2 и 3, функционально выполненные в виде СД, опорные напряжения которых представляют собой ортогональные гармонические сигналы, формируемые блоком 1 из поступающего на его вход гармонического сигнала с выводов «b» и «d».

На выходе блока 2 выделяется электрический сигнал, синфазный питающему напряжению блока 4. Значение этого электрического сигнала в основном определяется величиной активного сопротивления обмотки электродвигателя, зависящей от температуры ее перегрева. В свою очередь, на выходе блока 3 формируется электрический сигнал, квадратурный питающему напряжению блока 4, значение которого определяется величиной магнитного сопротивления магнитопровода электродвигателя, изменяющегося под действием деградиционных процессов в магнитопроводе.

Электрические сигналы с детекторов 2, 3 и 4 под управлением блока 8 преобразуются соответствующими АЦП 5, 6 и 7 в цифровые сигналы, которые вводятся в блок 8 и им же алгоритмически обрабатываются. По результатам алгоритмической обработки вырабатывается необходимая диагностическая информация.

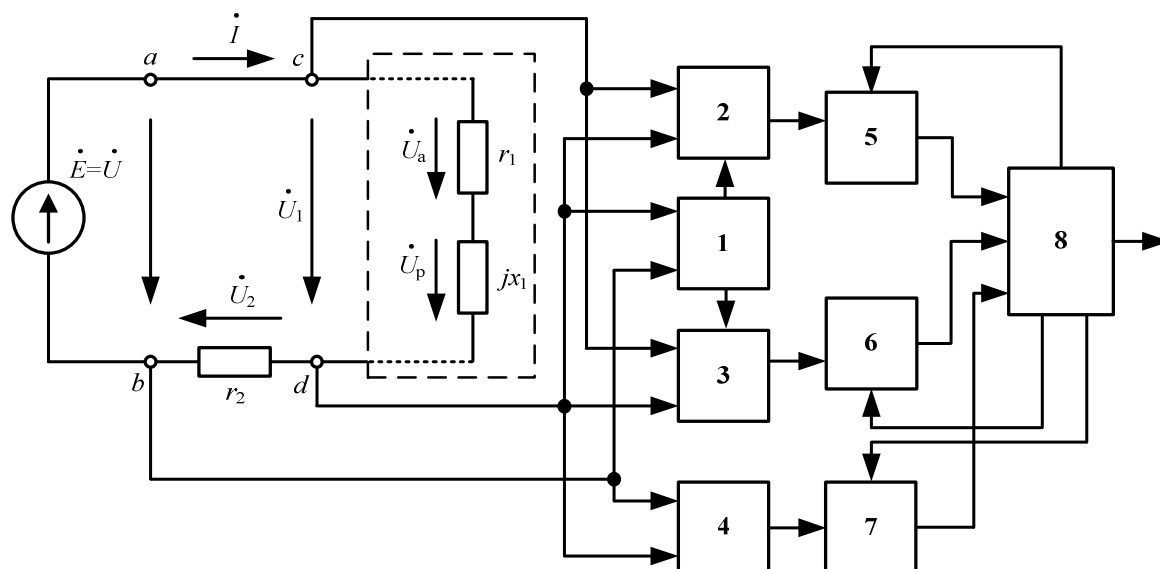


Рис. 8. Блок-схема аппаратной реализации предлагаемого способа диагностики ЭМПТ

Таким образом, разработанный способ расширяет перечень диагностируемых параметров, обеспечивает высокую точность и возможность дистанционного автоматизированного процесса измерений при упрощении самой процедуры диагностики. Тем самым снижается вероятность аварийных отказов ЭМПТ и соответственно повышается надежность и срок службы электрооборудования в целом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённые экспериментальные исследования нового способа диагностики ЭМПТ подтвердили эффективность предложенного подхода при его разработке. Устройство, реализующее предложенный способ, обеспечивает высокую степень точности и достоверности результатов измерения параметров. Сравнение результатов применения предлагаемой методики диагностирования при определении температурных режимов АД типа 4A80B4 и результатов, полученных в соответствии с методиками по [4, 5], показали повышение точности измерения температуры обмотки двигателя на 12-15% при существенном упрощении самой процедуры контроля и заметном повышении его оперативности. Все это позволяет производить оперативную техническую диагностику на работающем оборудовании, без отключения питания и/или снятия нагрузки, что имеет принципиальное значение для обеспечения надежности функционирования электрооборудования.

Широкое использование нового метода измерения снижает погрешности измерения параметров обмоток электрических машин переменного тока за счет информационной избыточности и алгоритмизации обработки измерительной информации. Это позволит организовать соответствующий оперативный автоматический мониторинг за техническим состоянием ЭМПТ и, тем самым, улучшить один из главных категорий их качества – эксплуатационную надежность.

Следует отметить, что предложенный способ может быть с успехом использован не только для контроля параметров и соответственно эксплуатационной диагностики электрических машин, но и для любого другого электрооборудования переменного тока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Методы диагностики асинхронных двигателей [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://testslg.ru/nauchno-issledovatel'skaya-rabota/stati/45-metody-dagnostiki-sinkhronnykh-dvigatелеj.html>.
2. Faiz J., Ebrahimi B.V., Sharifian M.B. Different Faults and Their Diagnosis Techniques in Three-Phase Squirrel-Cage Induction Motors: A Review // *Electromagnetics*. Vol. 26. 2006. Iss. 7. P. 543-569.
3. Thomson W.T., Stewart I.D. On-line current monitoring for fault diagnosis in inverter fed induction motors // *IEE Third international conference on power electronics and drives*, 13-15 July 1988. London, 1988. P. 432-435.
4. ГОСТ 7217-87. Машины электрические вращающиеся. Двигатели асинхронные. Методы испытаний. М.: Изд-во стандартов, 2003. 41 с.
5. ГОСТ 27222-91. Машины электрические вращающиеся. Измерение сопротивления обмоток машин переменного тока без отключения от сети. М.: Изд-во стандартов, 1991. 20 с.
6. Достов Л.И. Состояние и перспективы развития средств измерения температуры обмоток электрических машин в рабочих режимах // *Электротехническая промышленность*. Сер. 01. Электр. машины: обзор. информ. 1990. Вып. 30. 44 с.
7. Bochkarev I.V. Measuring the winding temperature of AC machines under load // *Russian Electric Engineering*. New York, Allerton Press, Inc. 1999. Vol. 70. No. 2. P. 28-32.
8. Родькин Д.И., Здор И.В. Современные методы определения параметров асинхронных двигателей после их ремонта // *Вестник КГПУ. Труды КГПУ*. 2000. Вып. 1. С. 76-81.
9. Рогозин Г.Г. Определение электромагнитных параметров машин переменного тока. К.: Техніка, 1992. 168 с.
10. Пат. 2422839 Российская Федерация, МПК G01R27/26. Способ определения индуктивности рассеяния фазы обмотки статора асинхронного электродвигателя и устройство для его реализации / Ковалев Ю.З., Ковалев А.Ю., Кузнецов Е.М.; заявитель Негосударственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Академический институт прикладной энергетики». №2009139123/28; заявл. 22.10.2009; опубл. 27.06.2011.
11. Брякин И.В. Метод адаптивной редукции // *Проблемы автоматизации и управления*. 2014. №1 (26). С. 134-143.
12. Брякин И.В. Методы и средства автоматизированного контроля технологических параметров: монография. Бишкек: КРСУ, 2017. 198 с.

Поступила в редакцию 8 сентября 2017 г.

INFORMATION IN ENGLISH

DIAGNOSTICS OF PARAMETERS OF AC ELECTRIC MACHINES

Ivan V. Bryakin

D.Sc. (Eng.), Senior Researcher, Institute of Automation and Information Technology, National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic, Bishkek, Kyrgyz Republic. E-mail: bivas2006@yandex.ru.

Igor V. Bochkarev

D.Sc. (Eng.), Professor, Department of Electrical Engineering, Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov, Bishkek, Kyrgyz Republic. E-mail: elmech@mail.ru.

Kasymbek K. Kelebaev

Director, Bishkek Technical College, Bishkek, Kyrgyz Republic. E-mail: mskkkk@mail.ru.

The paper presents the results of a study aimed at solving the problem of diagnosing the technical condition of electric alternating current machines directly in operational modes of operation without disconnecting them from the network. For this purpose, it is proposed to use the electric parameters of the stator winding, namely, its active and inductive resistances. It is shown that the use of these parameters as a source of diagnostic information will allow ensuring the reliability of diagnostic assessments, as well as digital processing and analysis of measurement results. A new diagnostic method is proposed, which provides high accuracy of measurements and does not require the use of additional equipment.

Keywords: AC electric machine, active and inductive resistance of stator winding, passive two-terminal network, vector diagram, measuring shunt, selective transformation of signals with periodic weight function, synchronous detector.

REFERENCES

1. Methods of diagnostics of asynchronous motors [Electronic resource]. Access mode: <http://testslg.ru/nauchno-issledovatel'skaya-rabota/stati/45-metody-diagnostiki-sinkhronnykh-dvigatlej.html>.
2. Faiz J., Ebrahimi B.V., Sharifian M.B. Different Faults and Their Diagnosis Techniques in Three-Phase Squirrel-Cage Induction Motors: A Review. *Electromagnetics*, vol. 26, 2006, iss. 7, pp. 543-569.
3. Thomson W.T., Stewart I.D. On-line current monitoring for fault diagnosis in inverter fed induction motors. *IEEE Third international conference on power electronics and drives*, 13-15 July 1988. London, 1988, pp. 432-435.
4. State Standart 7217-87. *Rotating electric machines. Asynchronous motors. Test methods*. Moscow: Publishing Standards, 1987. 41 p. (In Russian)
5. State Standart 27222-91. *Electric rotating machines. Measuring the resistance of winding machines of alternating current without disconnecting from the network*. Moscow: Publishing Standards, 1991. 20 p. (In Russian)
6. Dostov L.I. State and perspectives of development of means for measuring the temperature of windings of electric machines in operating conditions. *Power industry. Ser. 01. Electrical machines: Overview. inform.* 1990, iss. 30, 44 p. (In Russian)
7. Bochkarev I.V. Measuring the winding temperature of AC machines under load. *Russian Electric Engineering*. New York, Allerton Press, Inc. 1999, vol. 70, no. 2, pp. 28-32.
8. Rodkin D.I., Zdor I.V. Modern methods of determining the parameters of induction motors after repair. *Proceedings of KDPU. Scientific papers KDPU*. 2000, iss. 1, pp. 76-81. (In Russian)
9. Rogozin G.G. *Opreделение elektromagnitnykh parametrov mashin peremennogo toka* [Determination of electromagnetic parameters of alternating current machines]. Kiev: Tekhnika, 1992. 168 p.
10. Kovalev Yu.Z., Kovalev A.Yu., Kuznetsov E.M. *Sposob opredelenij induktivnosti rassejnykh faznykh obmotki statora asinchronnogo elektrodvigatlej i ustrojstvo dlj ego realizatsii* [Method for determining the inductance of phase scattering of the stator winding of an asynchronous electric motor and the device for its implementation]. Patent RF, no. 2422839, 2011. (In Russian)
11. Bryakin I.V. The method of adaptive reduction. *Problems of Automation and Control*. 2014. no. № 1 (26), pp. 134-143.
12. Bryakin I.V. *Metody i sredstva avtomatizirovannogo kontrolya tekhnologicheskikh parametrov* [Methods and means of automated control of technological parameters: monograph]. Bishkek: KRSU, 2017. 198 p.

Брякин И.В., Бочкарев И.В., Келебаев К.К. Диагностика параметров электрических машин переменного тока // Электротехнические системы и комплексы. 2017. № 4(37). С. 38-44. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-4\(37\)-38-44](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-4(37)-38-44)

Bryakin I.V., Bochkarev I.V., Kelebaev K.K. Diagnostics of Parameters of AC Electric Machines. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2017, no. 4(37), pp. 38-44. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-4\(37\)-38-44](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-4(37)-38-44)