

УДК 658.382.3

ОСНОВЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО ИНДУКЦИОННОГО КОНТРОЛЯ ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТОК ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Смирнов Геннадий Васильевич¹,

smirnov@main.tusur.ru

Смирнов Дмитрий Геннадьевич¹,

smirnov@main.tusur.ru

¹ Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
Россия, 634045, г. Томск пр. Ленина, 40.

Актуальность работы обусловлена тем, что электрические машины применяются в большинстве производственных процессов разнообразных отраслей промышленности. Отказ электрической машины приводит к аварийным ситуациям, к простоем оборудования и, как следствие, к высоким экономическим затратам на ликвидацию результатов отказа машины. Особенно ощутимы результаты отказа электрических машин при разведке, добыче и транспортировке георесурсов в нефтедобывающей, горнорудной, угольной, химической и других отраслях промышленности, так как эти отрасли в настоящее время являются основой формирования бюджета страны. Надежность и безотказность работы этих машин зависит от состояния витковой изоляции, роль которой играет эмалевая изоляция обмоточных проводов, поэтому совершенствование контроля эмалевой изоляции обмоточных проводов, повышение их качества является весьма злободневным.

Цель работы: изучение возможности использования электромагнитной индукции для неразрушающего контроля эмалевой изоляции обмоточных проводов.

Методы исследования: электромагнитные, для генерирования и исследования характеристик сигнала контактного первичного преобразователя дефектов; микрометрические, для определения геометрических размеров дефектов в эмалевой изоляции и сопоставления их с результатами контроля.

Результаты. Исследованы возможности применения контактных датчиков дефектов для контроля изоляции обмоточных проводов при использовании наведенной ЭДС в качестве сигнала в жиле контролируемого провода. Разработан способ контроля дефектности эмалевой изоляции проводов, позволяющий определять количество и протяженность дефектных участков движущегося в ней с любыми переменными скоростями провода. Предложена схема измерителя дефектности, и рассмотрен принцип его работы. Выявлена систематическая погрешность при контроле протяженности дефектов, обусловленная конечными размерами датчика дефектов, и приведен способ её устранения.

Ключевые слова:

Эмалевая изоляция, дефект, датчик дефектов, индукция, генератор наводки, потенциал, импульс с дефекта, протяженность, частота, датчик скорости.

Введение

В настоящее время основная доля отказов электроприводов общепромышленного применения, в частности горнодобывающего и нефтепромыслового оборудования, связана с дефектами в витковой изоляции обмоток [1–9], роль которой выполняет эмалевая изоляция обмоточных проводов. Готовые эмалированные провода проходят многочисленные лабораторные испытания [10–15]. Слой изоляции на проводах не является идеально однородным. Существуют небольшие дефекты, трещины и микроотверстия, которые делают возможным контакт окружающей атмосферы и металлической жилы. Дефектность изоляции обмоточных проводов является основной причиной отказа обмоток электрических машин [7], поэтому необходимо осуществлять контроль дефектности проводов не только на стадии их производства, но и в процессе изготовления из них намоточных изделий [16]

В настоящее время для контроля дефектности эмалевой изоляции проводов используют ГОСТ ИЕС 60851–5–2011 [17]. В соответствии с этим документом целостность изоляции выражается числом точечных повреждений на проводе определенной длины, зафиксированных с помощью элек-

трического испытательного устройства. Точечные повреждения для проводов с жилой номинальным диаметром до 0,050 мм включительно определяют при низком напряжении при помощи датчика, состоящего из двух фетровых пластин, погруженных в раствор водного сернокислого натрия Na_2SO_4 (концентрация 30 г/л), между которыми со скоростью (275 ± 25) мм/с протягивается контролируемый провод. При этом между жилой провода и раствором, соединенными в электрическую цепь, прикладывают испытательное напряжение постоянного тока (50 ± 3) В. Точечные повреждения фиксируют соответствующим реле со счетчиком.

Для проводов с диаметром жилы, лежащей в диапазоне от 0,050 до 0,25 мм используют электрод-датчик, выполненный в виде двух роликов. Контролируемый провод протягивается через датчик, образованный 4 роликами, два из которых являются направляющими, а два других – электродами датчика. Для проводов с диаметром, лежащим в диапазоне от 0,25 до 1,60 мм, этот датчик уже не применим, и взамен него используют один высоковольтный электрод большего диаметра. При таком контроле провод многократно перегибается. Это приводит к высоким механическим

нагрузкам на изоляцию провода со стороны роликов, что вызывает не только ослабление механической и электрической прочности изоляции контролируемого провода, но и к появлению дополнительных дефектов в изоляции провода.

Рассмотренные выше способы контроля дефектности не позволяют определять протяженность дефектов, которая является не менее важной характеристикой поврежденности изоляции, чем количество дефектов [16].

Основным же недостатком известных способов контроля, как с контактными, так и бесконтактными датчиками дефектов, является необходимость заземления жилы контролируемого провода. Для заземления жилы очищают один конец контролируемого провода от эмалевой изоляции и подсоединяют его к земле. Поскольку при контроле провод перемещается, то заземление его жилы на практике реализовать не всегда возможно. Такая ситуация возникает, в частности, если контроль происходит при сматывании провода с катушки, где не всегда имеется доступ к концу провода, находящегося внутри катушки. В том случае, когда жилу провода можно заземлить, конец провода необходимо очистить от эмалевой изоляции и подсоединить его к заземленному источнику провода, что усложняет реализацию способа. Кроме того, при заземленной жиле провода и применении высоковольтных газоразрядных бесконтактных датчиков дефектов может произойти пробой и дополнительное разрушение изоляции провода, делаю его непригодным для использования в обмотках электрических изделий.

Использование же контактных фетровых датчиков, смоченных подсоленной водой (электролитом) загрязняет поверхность изоляции и делает её также малоприспособной для использования в намоточных изделиях. Поэтому способы, основанные на применении упомянутых видов датчиков, следует считать разрушающими. В связи с этим вышеупомянутый стандарт применяют только для выборочного контроля на отрезках провода длиной (301) м.

Указанные недостатки стимулировали поиск более универсальных и точных способов и устройств контроля дефектности изоляции проводов.

Обоснование индукционного способа и его реализации

В работе [16] подробно изложены основы контроля дефектности с использованием высоковольтного газоразрядного датчика дефектов, устраняющие основные недостатки контроля, предписанного стандартом [17]. Несмотря на все достоинства способа контроля [16], он имеет ряд своих недостатков. Основным из них является необходимость использования высокого напряжения на датчике, что может привести к нестабильностям времени загорания и погасания разряда при подходе и выходе дефектного участка изоляции из зоны действия датчика дефектов. Это вносит определен-

ные сложности при контроле не только количества, но и протяженности дефектов. Поиск путей контроля дефектов, свободных от этого недостатка, позволил нам обнаружить возможность регистрации дефектов в изоляции движущегося провода вообще без подачи питающего напряжения на датчик дефектов. Такая возможность была выявлена при протягивании контролируемого провода с незаземленной жилой через контактный датчик, выполненный из проводящей резины [18]. Выход упомянутого датчика был подключен к входу осциллографа. При прохождении дефектного участка жилы через датчик на экране осциллографа появлялся импульсный сигнал. Причина этого заключалась в том, что в любом помещении, использующем переменное напряжение 50 Гц, вокруг проводов возникает переменное электромагнитное поле указанной частоты. Это поле индуцирует в контролируемом проводе ЭДС, и на его жиле возникает переменный электрический потенциал. Датчик из проводящей резины, обжимающий провод, при прохождении через него дефектного участка изоляции соприкасается с жилой провода. Наведенный в ней потенциал через датчик передается на вход осциллографа, где и регистрируется в виде импульса.

Выявленный процесс позволил создать принципиально отличающийся от известных индукционный способ контроля дефектов [19]. Если бы было необходимо регистрировать только количество дефектов в контролируемом проводе, как это следует из стандарта [17], то в реализации упомянутого контроля достаточно было бы ограничиться сетевой наводкой, возникающей в окружающей среде от протекающего по электрической сети тока промышленной частоты. В частности, использование сетевой наводки с применением датчика из проводящей резины показало нам возможность создания предлагаемого индукционного контроля. Однако в разрабатываемом способе предусматривается возможность помимо количества дефектов контролировать и их протяженность, независимо от того, с какой скоростью протягивается контролируемый провод через датчик дефектов. Учитывая этот факт, в измеритель дефектности потребовалось ввести генератор, частота которого изменяется пропорционально скорости провода. Схема устройства, реализующего этот способ, приведена на рис. 1.

Сущность предлагаемого контроля заключается в следующем. При контроле дефектности (рис. 1) провод сматывают с катушки 1, закрепленной на оси 2. Генератором 7 индуктора генерируются периодически изменяющиеся во времени импульсы, которые излучаются индуктором 3. За счет индуктивной и емкостной связи между катушкой индуктора 6 и катушкой 1 контролируемого провода в последней, а, следовательно, в проводе 14 индуцируется периодически изменяющаяся во времени ЭДС. При этом если скорость провода в процессе контроля изменяется, то пропорционально ей из-

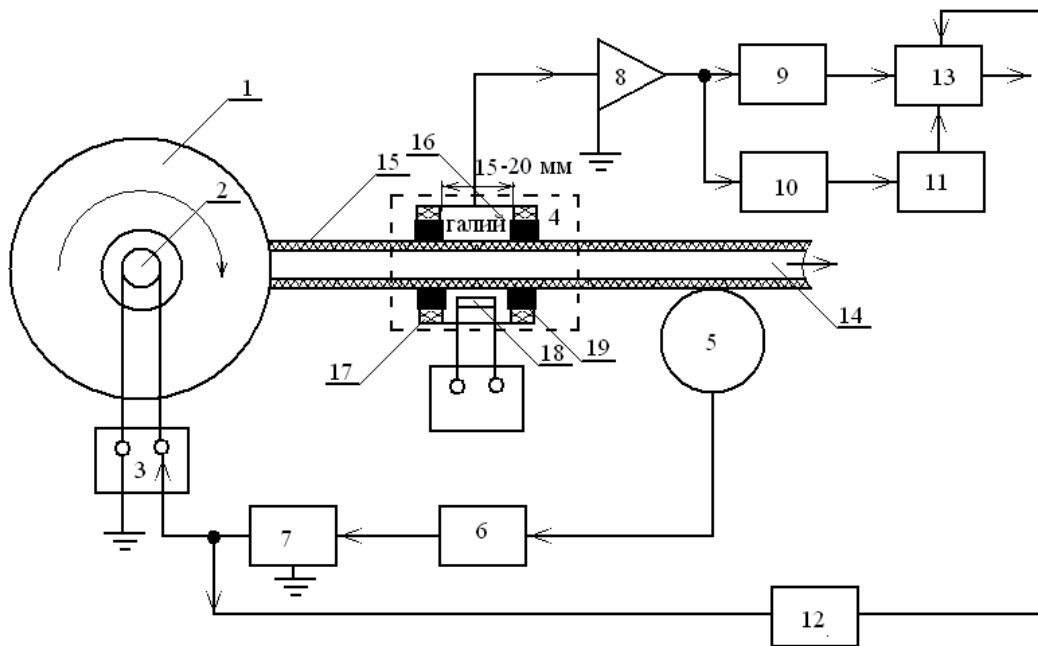


Рис. 1. Схема устройства контроля дефектов и эюры сигналов: 1 – катушка контролируемого провода; 2 – ось катушки; 3 – индуктор; 4 – датчик точечных повреждений; 5 – датчик скорости; 6 – электронный блок; 7 – генератор индуктора; 8 – высокоомный усилитель; 9 – счетчик протяженности дефектов; 10 – низкочастотный фильтр; 11 – счетчик количества дефектов; 12 – счетчик длины проконтролированного провода; 13 – арифметический блок; 14 – жила провода; 15 – эмаль-изоляция провода; 16 – галлий; 17 – корпус датчика точечных повреждений; 17 – уплотнитель; 18 – нагревательный элемент; 19 – терморегулятор

Fig. 1. Diagram of the device for controlling defect and plot of signals: 1 is the coil of the controlled wire; 2 is the coil axis; 3 is the inductor; 4 is the point damage sensor; 5 is the speed sensor; 6 is the electronic unit; 7 is the inductor generator; 8 is the high impedance amplifier; 9 is the meter of defects length; 10 is the low-pass filter; 11 is the defects counter; 12 is the meter of the controlled wire length; 13 is the arithmetic unit; 14 is the wire core; 15 is the wire enamel insulation; 16 is the gallium; 17 is the case of the sensor of point damage; 17 is the gasket; 18 is the heating element; 19 is the thermostat

меняется частота и, следовательно, изменяется длительность периода одного наведенного колебания ЭДС, но обратно пропорционально скорости движения провода. Этот факт наглядно демонстрирует эюра А на рис. 2.

Действительно, если скорость провода изменяется, например, как показано на упомянутой эюре, в диапазоне от 0,5 до 2 В, то частота индуцированной ЭДС и длительность одного периода Т наведенной ЭДС также изменяются, но от 2 до 0,5 Т.

Когда через датчик точечных повреждений 4 проходят бездефектные участки эмалевого изоляции провода 15, на вход высокоомного усилителя 8 сигнал не поступает. При прохождении через датчик точечных повреждений дефектного участка изоляции жила провода 14 через контактный датчик точечных повреждений 4 и входное сопротивление высокоомного усилителя 8 подключается к общей точке (земле), которую также имеет и генератор 7 индуктора. Поскольку в жиле провода индуцируется ЭДС, то эта ЭДС поступает на вход высокоомного усилителя 8 и на его выходе появляется усиленный сигнал в виде серии импульсов наведенной ЭДС (рис. 2, эюра В). Этот сигнал поступает на счетчик протяженности дефектов 9, где регистрируется количество периодов наведенной ЭДС. При этом если протягивать один и тот же де-

фектный участок с фиксированной протяженностью через датчик точечных повреждений с различными скоростями, то независимо от скорости протягивания количество зарегистрированных импульсов, поступающих в счетчик 9, остается неизменным (для примера на рис. 2, эюра В, показано, что при изменении скорости провода от 0,5 до 2 В в счетчик протяженности дефектов при прохождении одного и того же дефекта через датчик точечных повреждений поступает одно и то же количество импульсов, равное 3.

Одновременно этот сигнал поступает на вход низкочастотного фильтра 10 и на его выходе появляется импульс длительностью, равной времени прохождения поврежденного участка изоляции провода через датчик точечных повреждений (рис. 2, эюра D). Длительность каждого импульса обратно пропорциональна скорости провода, но всегда равна времени прохождения дефектным участком через датчик 4 точечных повреждений. Этот сформированный импульс поступает на вход счетчика количества дефектов 11, где и регистрируется. Количество К зарегистрированных счетчиком 11 импульсов при контроле провода равняется количеству К дефектов на этом проводе. По суммарному количеству периодов наведенной ЭДС, зарегистрированных счетчиком протяженности дефек-

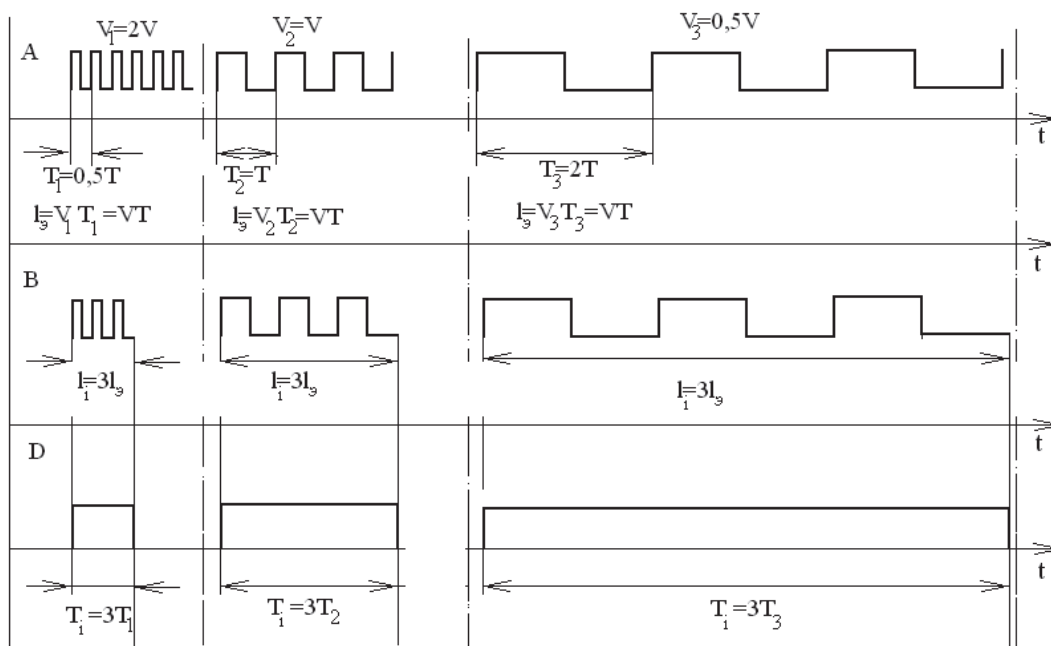


Рис. 2. Эпюры сигналов

Fig. 2. Diagrams of signals

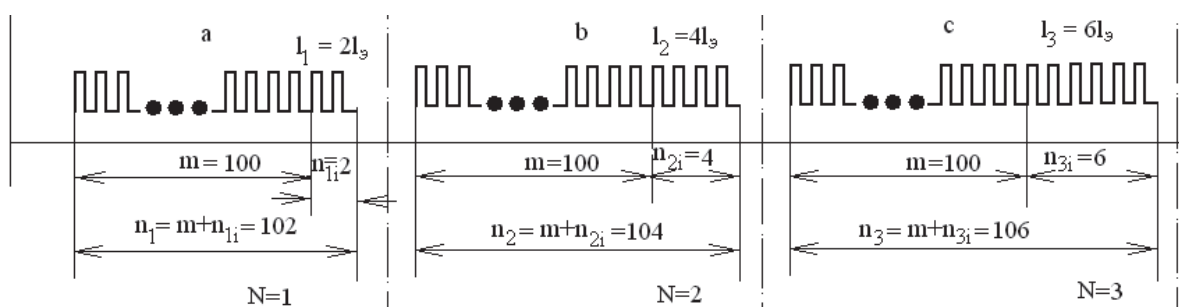


Рис. 3. Эпюры сигналов, иллюстрирующие пример реализации способа контроля дефектности

Fig. 3. Diagrams of signals illustrating an example of implementation of the defects controlling method

тов 9, и по количеству зарегистрированных импульсов в счетчике 11 можно определить протяженность поврежденных участков изоляции провода. Изменение скорости протягивания провода приводит к существенным погрешностям при определении протяженности дефектов. Чтобы этого не происходило, в цепи управления генератором 7 индуктора находится датчик 5 скорости и электронный блок 6, управляющий периодом наведенной в жиле провода 14 ЭДС. Датчик скорости 5 механически связан с контролируемым проводом, сматываемым с катушки 1 контролируемого провода. При увеличении скорости провода увеличивается частота наводимого датчиком скорости 5 сигнала. Сигнал с датчика 5 скорости через электронный блок 6 поступает на генератор 7 индуктора и на индуктор 3. Для того чтобы определить протяженность любого дефектного участка, общую длину всех выявленных дефектных участков на эмалевой изоляции контролируемого провода и

длину проконтролированного провода, необходимо предварительно откалибровать измерительное устройство. При калибровке следует определить принятую за единицу измерения элементарную длину провода l_0 , которая проходит через датчик 4 точечных повреждений и датчик скорости 5 за один период ЭДС, индуцированной индуктором 3 в жиле провода 14. Величина l_0 зависит от конструкции датчика скорости 5, схемы электронного блока 6 и схемы генератора индуктора 7. Поэтому для любой конкретной схемы, реализующей предлагаемый способ, необходимо экспериментально определить эту величину l_0 . Для этой цели отмеряют некоторый отрезок l_0 провода любыми точными измерителями длины и регистрируют количество импульсов скорости n , пришедших в счетчик длины проконтролированного провода 12 при протягивании этого отрезка через датчик скорости 5. По результатам измерений определяют элементарную протяженность провода l_0 по формуле

$$l_3 = \frac{l_\Phi}{n}. \quad (1)$$

Определенную по формуле (1) величину l_3 принимают за единицу меры протяженности дефекта и длины проконтролированного провода. Эта величина при любых скоростях движения провода остается неизменной, что наглядно представлено на рис. 2, эпюра А. Таким образом, благодаря наличию датчика скорости 5 результат измерения одного и того же по протяженности дефектного участка остается постоянным, независимо от того, с какой скоростью движется провод (рис. 2, эпюра В).

Систематическая погрешность и критерии оценки качества изоляции проводов

Казалось бы, что если в счетчике 9 протяженности дефектов при прохождении любого i -го дефекта через датчик точечных повреждений 4 зарегистрировано n_i импульсов (периодов индуцированной ЭДС), то протяженность l_i этого дефекта может быть определена по формуле

$$l_i = n_i l_3. \quad (2)$$

Однако в реальности количество зарегистрированных периодов n_i индуцированной ЭДС в счетчике протяженности дефектов 9 за время прохождения под датчиком точечных повреждений 4 i -го дефекта не точно определяет его протяженность l_i по формуле (2). Это происходит потому, что датчик точечных повреждений имеет вполне реальную конечную протяженность контакта с поверхностью контролируемого провода и это вносит систематическую погрешность в определение протяженности каждого дефектного участка. Для пояснения сущности возникающей упомянутой выше систематической ошибки допустим, что через датчик точечных повреждений проходит точечный дефект бесконечно малой протяженности. За время прохождения этого участка через датчик точечных повреждений счетчик протяженности дефектов 9 зарегистрирует m импульсов (m периодов наведенной ЭДС, рис. 2). Кажущаяся протяженность этого бесконечно малого точечного дефекта, в соответствии с выражением (2), равна: $\Delta l = l_3 m$. Иными словами, конечная протяженность датчика точечных повреждений вносит систематическую ошибку в определение протяженности дефектов и ее необходимо исключить. Для исключения этой ошибки необходимо определить число m ложных импульсов, обусловленных конечными размерами датчика точечных повреждений. Для определения количества m ложных импульсов нанесем на провод два дефекта с отличающимися друг от друга, но четко измеренными при помощи точных мер длины протяженностями дефектных участков l_1 и l_2 и протянем эти участки провода через датчик точечных повреждений 4 и датчик скорости 5. Пусть протяженность первого дефекта в N раз меньше, чем протяженность второго участка. Предположим, что при прохождении этих двух участков через датчик точечных повреждений и датчик скорости

счетчик протяженности дефектов 9 регистрирует n_1 и n_2 импульсов индуцированной ЭДС с каждого дефекта соответственно (рис. 3). Так как в каждом из зарегистрированных количеств импульсов n_1 и n_2 помимо истинных импульсов n_{1i} и n_{2i} , определяющих протяженность каждого из дефектов, содержатся и m ложных импульсов, зависящих от размеров датчика, то можно записать систему уравнений:

$$n_1 = n_{1i} + m, \quad (3)$$

$$n_2 = n_{2i} + m = N n_{1i} + m. \quad (4)$$

Решив систему уравнений относительно величины m , получим:

$$m = \frac{n_1 N - n_2}{N - 1}. \quad (5)$$

Пусть через датчик точечных повреждений проходит дефект известной протяженности l_i . При прохождении этого дефекта через датчик точечных повреждений 4 в счетчике протяженности дефектов 9 регистрируются n_j импульсов индуцированной в проводе ЭДС (рис. 3).

Истинная протяженность одного дефекта l_i с учетом ложных m импульсов, зарегистрированных счетчиком 10, может быть рассчитана по формуле

$$l_i = (n_j - m) \cdot l_3 = \left(n_j - \frac{n_1 N - n_2}{N - 1} \right) \cdot l_3. \quad (6)$$

При прохождении контролируемого провода через датчик 4 точечных повреждений счетчик количества дефектов 11 регистрирует количество дефектов, равное K . Истинная протяженность поврежденной изоляции контролируемого провода, с учетом количества подсчитанных на контролируемом проводе дефектов K и формулы (6), равна:

$$l_{\text{сум}} = l_3 = \left[\sum_{i=1}^K n_i - K \frac{n_1 N - n_2}{N - 1} \right]. \quad (7)$$

Таким образом, для определения истинной суммарной протяженности поврежденной изоляции $l_{\text{сум}}$ необходимо регистрировать общее количество дефектов K на контролируемом проводе счетчиком количества дефектов и количество периодов n_i наведенной ЭДС счетчиком протяженности дефектов и общую протяженность дефектов в изоляции контролируемого провода определять по формуле (7).

Для более точной оценки качества каждого из контролируемых проводов необходимо еще знать длину проконтролированного провода $l_{\text{пр}}$ и найти поврежденность изоляции провода на единицу его длины. Для этой цели служит счетчик 12 (рис. 1) длины проконтролированного провода, с помощью которого подсчитывают общее количество $n_{\text{пр}}$ периодов наведенной ЭДС за время контроля провода. Длину проконтролированного провода определяют по формуле

$$l_{\text{пр}} = n_{\text{пр}} l_3. \quad (8)$$

По результатам всех измерений можно оценить качество эмалевой изоляции провода по двум параметрам, позволяющим более точно оценить каче-

ство эмалевой изоляции контролируемого провода: по количеству дефектов K_1 , приходящихся на единицу длины проконтролированного провода, и по среднестатистической протяженности дефектов K_2 , приходящихся на единицу длины проконтролированного провода:

$$K_1 = \frac{K}{l_{\text{пр}}}, \quad (9)$$

$$K_2 = \frac{l_{\text{сум}}}{l_{\text{пр}}}. \quad (10)$$

Подсчет всех этих качественных параметров осуществляется в арифметическом блоке 13 (рис. 1).

Возможные варианты датчиков дефектов для индукционного способа контроля

В соответствии с нормативным документом [17] в качестве контактного датчика для непрерывного контроля изоляции проводов используют две фетровые пластины, погруженные в водный раствор сернокислого натрия Na_2SO_4 (концентрация 30 г/л). При этом между жилой провода и раствором, соединенных в электрическую цепь, прикладывают испытательное напряжение постоянного тока (50 ± 3) В при разомкнутой цепи. В соответствии с этим способом при помощи упомянутого датчика определяют целостность изоляции, которая выражается числом точечных повреждений изоляции провода, зафиксированных с помощью электрического испытательного устройства.

Точечные повреждения фиксируют соответствующим реле со счетчиком. Счетчик должен срабатывать при сопротивлении изоляции провода менее 10 кОм в течение не менее 0,04 с. Счетчик не должен срабатывать при сопротивлении 15 кОм и более. Цепь для определения повреждений должна работать со скоростью срабатывания (5 ± 1) мс, обеспечивая регистрацию с частотой (500 ± 25) повреждений в минуту при протягивании провода без изоляции.

Недостаток указанного датчика заключается в том, что, во-первых, электролитический состав в течение работы может изменять свою концентрацию, а его электропроводимость зависит от температуры контроля, что влечёт за собой изменение сопротивления в контакте между датчиком точечных повреждений и влияет на точность и информативность контроля. Кроме того, чувствительность датчика низка, поэтому его используют только для контроля изоляции тонких проводов, диаметр которых не превышает 0,5 мм.

Известен также датчик для непрерывного контроля изоляции проводов, описанный в [18].

Датчик (рис. 4) содержит расширительный элемент 1, формирующую обойму 2, нагреватель 3, проводящий эластичный обжим 4, источник света 5, фотоэлектрический преобразователь 6, контролируемый провод 7, преобразователь фотоэлектрического тока в напряжение 8, управляемый источ-

ник тока 9, причем расширительный элемент расположен внутри расточки обоймы, обжим находится внутри отверстия в расширительном элементе, источник света и фотоэлектрический преобразователь расположены внутри обоймы, по разные стороны от обжима. Преобразователь 6 соединен с входом преобразователя 8, выход которого соединен с источником 9. Источник 9 соединен с входом нагревателя 3.

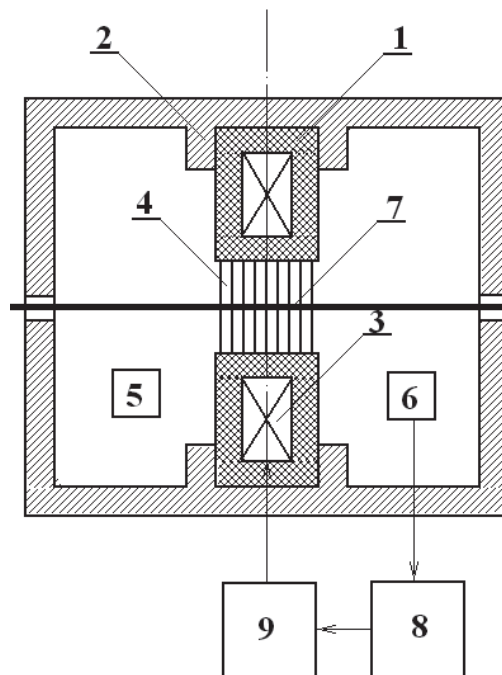


Рис. 4. Конструкция и схема регулирования параметров датчика дефектов на основе проводящей резины: 1 – расширительный элемент; 2 – формирующая обойма; 3 – нагреватель; 4 – проводящий эластичный обжим; 5 – источник света; 6 – фотоэлектрический преобразователь; 7 – контролируемый провод; 8 – преобразователь фотоэлектрического тока в напряжение; 9 – управляемый источник тока

Fig. 4. Design and scheme of controlling the parameters of defects sensor, based on conductive rubber: 1 is the expanding element; 2 is the forming clip; 3 is the heater; 4 is the conductive elastic crimp; 5 is the light source; 6 is the photoelectric converter; 7 is the controlled cable; 8 is the transducer of the photoelectric current voltage; 9 is the controlled current source

Датчик работает следующим образом. Контролируемый провод протягивается через отверстие в обжиме, который плотно прилегает к поверхности провода. При появлении зазора между поверхностью провода и обжимом возникает световой поток, проходящий через этот зазор от источника света 5. Световой поток попадает на преобразователь 6 и вызывает протекание через него электрического тока. Преобразователь 8 преобразует этот ток в напряжение, управляющее источником 9. Ток источника 9, при возрастании напряжения на выходе преобразователя 8, увеличивается и, протекая через нагреватель 3, вызывает рост температуры в расширительном элементе 1, приводя к его

расширению. Ввиду того, что обойма 2, в которую вставлен элемент 1, препятствует увеличению его внешнего диаметра, происходит уменьшение его внутреннего диаметра. При этом обжим поджимается к поверхности провода 7 и зазор уменьшается. В результате уменьшается световой поток, попадающий через зазор от источника света 5 на преобразователь 6. Ток, протекающий через преобразователь, уменьшается. На это уменьшение реагирует преобразователь 8, который уменьшает ток источника 9, протекающий через нагреватель 3.

Недостатком датчика является сложность его конструкции, малая надежность и долговечность, низкая точность и чувствительность.

В значительной мере указанные недостатки устраняет датчик, приведенный в работе [19, 20].

На рис. 5 и 6 приведена конструкция датчика и принципиальная схема, служащие для пояснения принципа его работы. Датчик (рис. 5) состоит из корпуса 1, колпака 2, рабочего элемента (галлия) 5, греющего источника 17 с плавно изменяющейся мощностью, термодатчика 19, трубы кожуха 13, схемы регулирования мощности греющего источника 25 (рис. 6), стойки с платформой 10 и подвижной стойки 14. Корпус 1 и колпак 2 выполнены из теплопроводящего материала (меди) в виде

перевернутых в вертикальной плоскости на 180° по отношению друг к другу прямоугольных сосудов, по периметру которых в верхней торцевой части корпуса 1 и в нижней части колпака 2 выполнены одинаковые по конфигурации фланцы 3 и 4. Внешние размеры фланцев 3 и 4 одинаковы. Внутренний размер фланца 4 колпака 2 меньше внутреннего размера фланца 3 корпуса 1. Во фланце корпуса 1 выточена проточка, в которую вставлен уплотнитель 22. Корпус 1 и колпак 2 идентичны по конфигурации, но объем внутренней полости колпака V_1 больше объема V_2 внутренней полости корпуса 1. Объем V_1 полностью заполнен галлием 5. Фланцы корпуса 1 и колпака 2 присоединены друг к другу крепежными деталями. В стенках корпуса 1 просверлены сквозные соосные отверстия 7, вокруг которых с внешней стороны корпуса 1 выполнены проточки. В упомянутые проточки вставлены уплотняющие манжеты 8. С противоположных внешних сторон корпуса датчика 1 прикреплены две трубчатые оси 6 и 9, имеющие с обоих торцов фланцы. Одними торцевыми фланцами оси прикреплены крепежными деталями к корпусу датчика 1. Другие торцевые фланцы осей 21 и 23 являются ограничителями продольных перемещений. Уплотняющие манжеты 8 находятся между корпу-

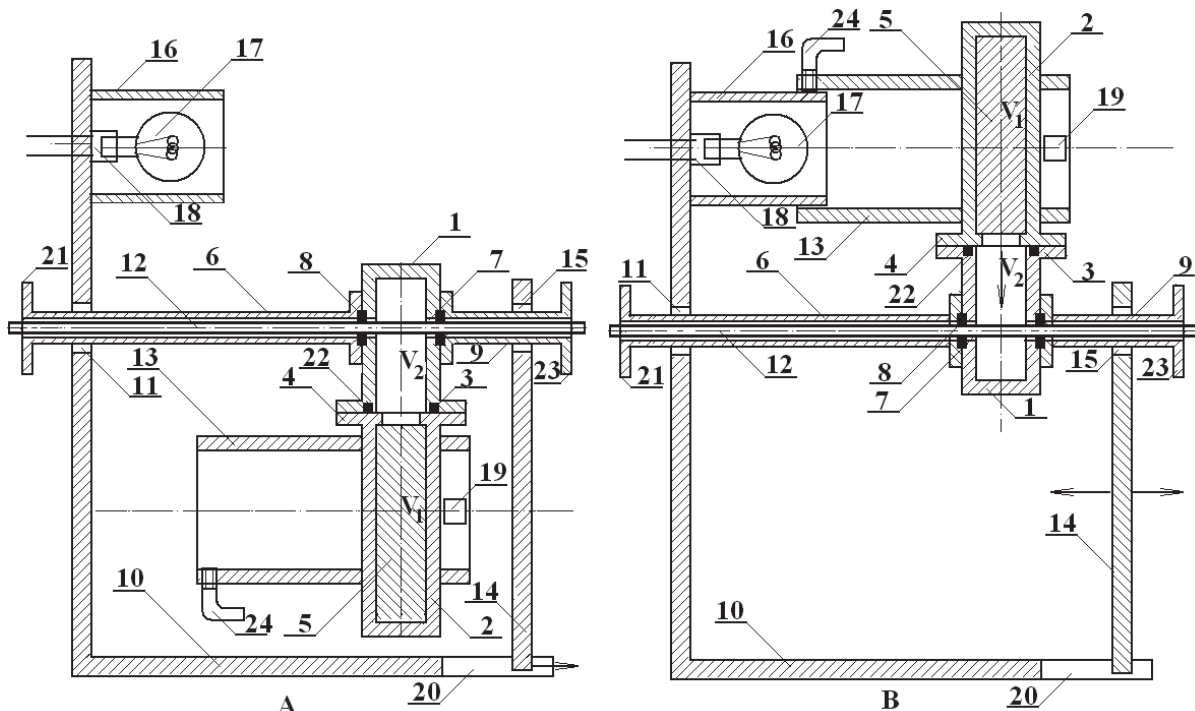


Рис. 5. Конструкция датчика контроля изоляции проводов в нерабочем (А) и рабочем (В) состоянии: 1 – корпус; 2 – колпак; 3 и 4 – фланцы; 5 – рабочий элемент (галлий); 6 и 9 – трубчатые оси греющего источника; 7 – уплотнительные манжеты; 8 – сквозные соосные отверстия; 10 – стойка с платформой; 11 – отверстие; 12 – контролируемый провод; 13 – труба кожуха; 14 – подвижная стойка; 15 – отверстие; 16 – труба; 17 – греющий источник; 18 – патрон; 19 – термодатчик; 20 – паз; 21 и 23 – ограничители оси; 22 – уплотнитель; 24 – греющий источник

Fig. 5. Design of the sensor for controlling wire insulation in idle (A) and operating (B) states: 1 is the body; 2 is the cap; 3 and 4 are the flanges; 5 is the working element (gallium); 6 and 9 are the tubular axes of heating source; 7 are the sealing cups; 8 are the end-to-end coaxial holes; 10 is the stand with a platform; 11 is the hole; 12 is the controlled cable; 13 is the casing pipe; 14 is the movable stand; 15 is the eye; 16 is the pipe; 17 is the heater; 18 is the cartridge; 19 is the temperature sensor; 20 is the groove; 21, 23 are the axis limiters; 22 is the gasket; 24 is the heating source

сом 1 и фланцами трубчатых осей 6 и 9. Внутренний диаметр трубчатых осей соответствует диаметру просверленных в корпусе 1 отверстий.

Наружный диаметр этих осей соответствует отверстию 11 в стойке 10. Трубчатая ось 6 входит в отверстие 11 стойки с платформой 10, а ось 9 входит в отверстие 15 подвижной стойки 14. Фланцы – ограничители осей 21 и 23 – расположены с противоположной от датчика стороны отверстий 11 и 15. Отверстие 11 в стойке с основанием 10 соосно отверстию 15 в подвижной стойке 14. Нижний конец подвижной стойки 14 расположен в пазу 20 платформы стойки с платформой 10 и может перемещаться в продольном направлении по расположенным внутри паза направляющим. К верхней части стойки платформы закреплена труба 16, выполненная из меди. Внутри трубы по её центральной оси к стойке с платформой 10 прикреплен патрон 18, в который вкручен греющий источник 17 с плавно изменяющейся мощностью.

К внешней стороне колпака 2 одним из торцов прикреплен труба кожуха 13, внутренний диаметр которой соответствуют внешнему диаметру трубы 16, прикрепленной к верхней части стойки с платформой 10. Труба кожуха 13 имеет отверстие с резьбой, в которое вкручен резьбовой фиксатор 24, оси вращения упомянутых туб 13 и 16 совпадают. С противоположной стороны корпуса 1 от трубы кожуха 13 расположено гнездо, в которое вставлен термодатчик 19, выход которого соединен с входом схемы регулирования мощности греющего источника 24 (рис. 6), выход которой соединен с входом греющего источника 17 с плавно изменяющейся мощностью.

Датчик работает следующим образом. В исходном состоянии имеет вид, изображенный на рис. 5, А. Рабочий элемент – галлий 5 полностью заполняет объем V_1 внутренней полости колпака 4, и галлий в этой полости находится в твердом состоянии. Заполняют эту полость расплавленным галлием

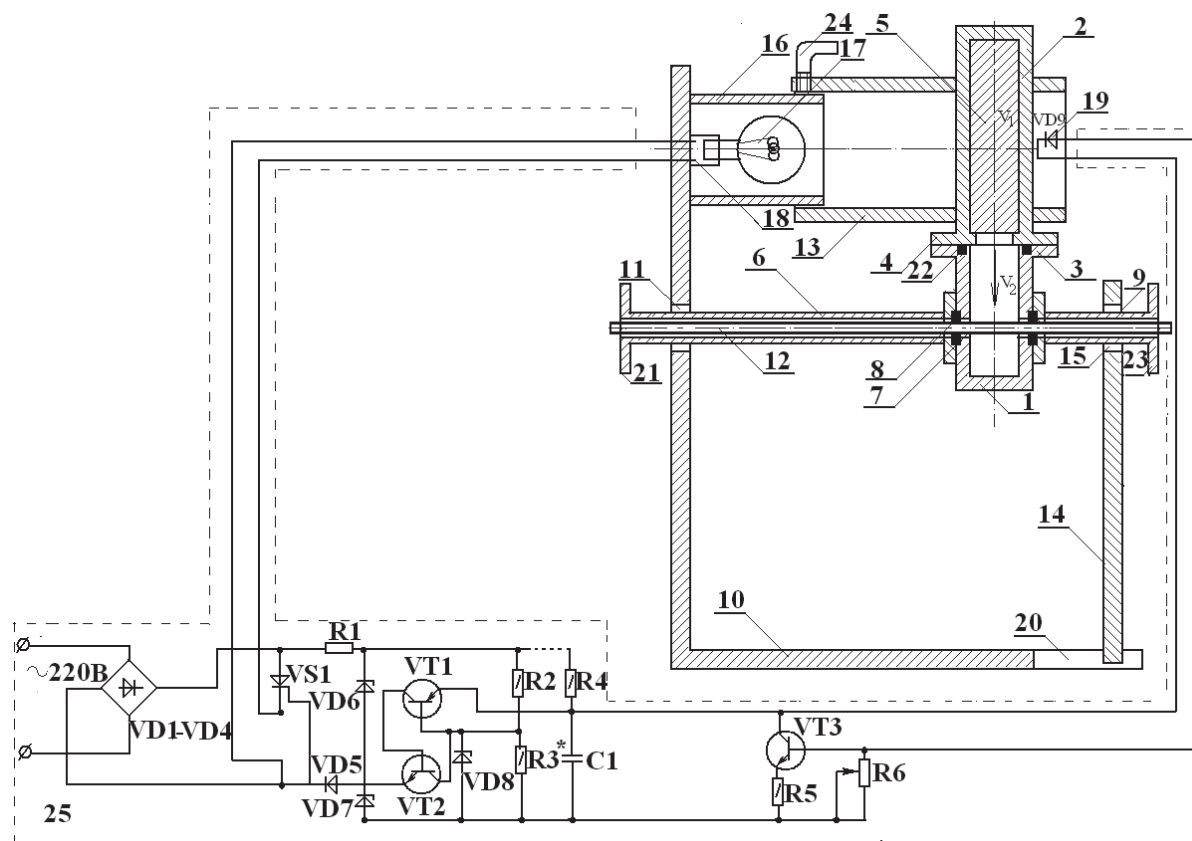


Рис. 6. Схема автоматического регулирования температуры в датчике: 1 – корпус; 2 – колпак; 3 и 4 – фланцы; 5 – рабочий элемент (галлий); 6 и 9 – трубчатые оси греющего источника; 7 – уплотнительные манжеты; 8 – сквозные соосные отверстия; 10 – стойка с платформой; 11 – отверстие; 12 – контролируемый провод; 13 – труба кожуха; 14 – подвижная стойка; 15 – отверстие; 16 – труба; 17 – греющий источник; 18 – патрон; 19 – термодатчик; 20 – паз; 21 и 23 – ограничители оси; 22 – уплотнитель; 24 – греющий источник; 25 – схема автоматического регулирования температуры; R1-R6 – резисторы; C1 – конденсатор; VT1-VT3 – транзисторы; VS1 – тиристор; VD1-VD8 – диоды

Fig. 6. Scheme of automatic control of temperature in the sensor: 1 is the body; 2 is the cap; 3 and 4 are the flanges; 5 is the working element (gallium); 6 and 9 are the tubular axels of the heating source; 7 are the sealing cups; 8 are the end-to-end coaxial holes; 10 is the stand with a platform; 11 is the hole; 12 is the controlled cable; 13 is the casing pipe; 14 is the movable stand; 15 is the eye; 16 is the pipe; 17 is the heater; 18 is the cartridge; 19 is the temperature sensor; 20 is the groove; 21, 23 are the axis limiters; 22 is the gasket; 24 is the heating source; 25 is the scheme of temperature automatic control; R1-R6 are the resistors; C1 is the capacitor; VT1-VT3 are the transistors; VS1 is the thyristor; VD1-VD8 are the diodes

при сборке датчика. Колпак 4 находится внизу, а корпус 1 сверху датчика. Контролируемый провод 12 протягивают через внутреннюю полость трубчатых осей 6 и 9, уплотнительные манжеты 8 и сквозные соосные отверстия 7, просверленные в корпусе 1.

После этого подвижную стойку 14 перемещают по направляющим в пазу 20 стойки с платформой 10 и трубчатые оси 6 и 9 в продольном направлении (вправо), после чего поворачивают датчик с колпаком на 180° вокруг осей 6 и 9. Фланцы-ограничители 21 и 23 расположены за отверстиями 11 и 15 стоек на расстоянии, достаточном для того, чтобы трубу кожуха 13 можно было насадить на трубу 16. Подвижную стойку 14, оси 6 и 9 и жестко связанные с ними корпус 1 и колпак 2 перемещают (вправо) и оси 6 и 9 поворачивают на 180° . Эти продольные и вращательные перемещения происходят до тех пор, пока труба 16 не войдет в трубчатый кожух 13 и датчик примет положение, изображенное на рис. 5, В. В этом положении колпак 2 находится сверху, а корпус 1 – внизу. Галлий 5 в твердом состоянии также находится сверху над корпусом 1 внутри колпака 2. Поскольку галлий находится в твердом состоянии, внутренний размер фланца 4 колпака 2 меньше, чем внутренний диаметр фланца 3 корпуса, то галлий 5, упираясь в обрванный буртик, не проваливается вниз.

После установления датчика в положение, изображенное на рис. 5, В, на вход схемы регулирования мощности греющего источника 25 (рис. 6) подают переменное напряжение 220 В.

Греющий источник 17 с регулируемой мощностью включается на полную мощность, предусмотренную схемой 25. Тепловая энергия от теплового источника 17 начинает прогревать пространство вокруг себя, которое включает: трубу 16, трубу кожуха 16. При температуре $29,8^\circ\text{C}$ галлий начнет плавиться и стекать в полость колпака датчика 2. Поскольку объем V_1 галлия (внутренней полости колпака датчика 2) больше объема V_2 полости корпуса 1, то расплавленный галлий полностью заполнит объем полости корпуса 1 и контролируемый провод 12 покроется слоем жидкого галлия 5. После этого можно приступать к контролю. По завершении контроля датчик вновь переводится в положение, изображенное на рис. 2, А. При этом из корпуса 1 стекает в колпак датчика 2. При отключении греющего источника 17, галлий 5 застывает в колпаке 2. Датчик подготовлен к следующему этапу контроля.

Схема регулирования мощности греющего источника 25 (рис. 6) предназначена для поддержания стабильной температуры внутри датчика [21], несколько превышающей температуру плавления галлия. Разогрев галлия происходит непрерывно, при строго определенной температуре, следующим образом. Силовой элемент (тиристор VS1) управляется фазоимпульсным методом. В момент включения нагревательный элемент 3 работает на полную мощность. По мере повышения температуры в

формообразующей обойме 1 мощность нагревательного элемента 3 плавно уменьшается. В рабочем режиме, при достижении заданной температуры, величина которой должна несколько превышать температуру плавления галлия, устанавливается термодинамическое равновесие, при котором количество тепла, получаемого от нагревательного элемента 3, становится равным количеству тепла, рассеиваемому в окружающую среду.

Транзисторы VT1, VT2 схемы тиристорного регулятора, приведенного на рис. 6, образуют аналог однопереходного транзистора. Диод VD8, включенный в обратном направлении, исполняет роль термодатчика 5, который установлен под формообразующей обоймой 1. Когда температура меньше рабочей, сопротивление термодатчика велико, транзистор VT3 закрыт и не оказывает влияние на работу однопереходного транзистора, тиристор открывается в начале каждого полупериода напряжения сети, нагревательный элемент 3 включен на полную мощность. При повышении температуры в формообразующей обойме сопротивление термодатчика VD9 уменьшается, транзистор VT3 переходит в проводящее состояние и начинает шунтировать интегрирующий конденсатор C1. Время его зарядки увеличивается, аналог однопереходного транзистора (VT1, VT2) станет включаться позже. Время включенного состояния тиристора VS1 станет меньше, мощность нагревательного элемента уменьшится. При достижении рабочей температуры в формообразующей обойме транзистор VT3 будет почти полностью открыт, а время включенного состояния тиристора станет минимальным, как и мощность нагревательного элемента 4. Он будет отдавать внутрь датчика столько тепла, сколько датчик отдает в окружающую среду. Такое состояние теплового равновесия будет сохраняться сколько угодно долго. Если температура в датчике начнет понижаться, то сопротивление термодатчика VD9 увеличится, сопротивление транзистора VT3 коллектор-эмиттер, выполняющего в данном процессе роль терморезистора, станет больше, интегрирующий конденсатор станет заряжаться быстрее, аналог однопереходного транзистора и тиристор будут открываться раньше, нагревательный элемент 3 будет дольше подключен к сети, количество тепла станет больше. Так будет до тех пор, пока температура не повысится до рабочей. Если температура станет выше рабочей, сопротивление термодатчика станет еще меньше, транзистор VT3 откроется полностью и «закоротит» интегрирующий конденсатор C1, тиристор VS1 выключится, нагревательный элемент отключится от сети. При понижении температуры процесс пойдет в обратном направлении. Переменный резистор R6 задает значение рабочей температуры внутри датчика. Стабилитрон VD8 стабилизирует работу аналога однопереходного транзистора. Если его исключить, точность поддержания температуры в датчике станет равной $\pm 1,5^\circ\text{C}$, что, конечно, не желательно. Диод VD5 защищает транзисторы VT1, VT2 от пробоя.

Последовательно включенные стабилитроны VD6, VD7 можно заменить одним стабилитроном, у которого напряжение стабилизации равно сумме напряжений стабилизации VD6 и VD7. Резистор R3 определяет напряжение открывания аналога однопереходного транзистора. На начальном этапе настройки вместо него включают переменный резистор с сопротивлением 20 кОм. После чего добиваются устойчивой работы терморегулятора в рабочем режиме. Отключают терморегулятор, измеряют сопротивление переменного резистора, и вместо него подключают постоянный резистор такого значения. Эта операция наиболее ответственна, и её, возможно, придется повторить несколько раз, чтобы наиболее точно подобрать R3. Может быть, также понадобится уточнить значение резистора R2. Транзистор VT3 должен иметь коэффициент усиления по току $\beta=60-100$. Большие значения коэффициента усиления делают терморегулятор слишком чувствительным, и даже незначительные флуктуации теплового потока в датчике изменяют режим его работы: он становится «колебательным». Меньшие значения коэффициента снижают точность поддержания температуры.

Для проверки работоспособности нами был изготовлен и опробован датчик для непрерывного контроля изоляции проводов по схеме, представленной на рис. 1. Корпус датчика и его колпак 2, труба кожуха 13 и труба 16 были выполнены из меди, так как она обладает достаточно высокой теплопроводностью. Объем внутренней полости колпака датчика $2 V_1 - 24\ 000\ \text{мм}^3$. Объем полости корпуса $V_2 - 1800\ \text{мм}^3$.

Оси 6 и 9 были выполнены из стальных трубок с внутренним диаметром 5 мм, а внешним – 10 мм. В стенках корпуса 1 на высоте 10 мм от внутренней поверхности дна стакана были просверлены сквозные соосные отверстия диаметром 0,5 мм, через которые протягивался контролируемый провод. Для предотвращения вытекания расплавленного галлия из проточки вокруг отверстий были выполнены расточки, внутрь которых были вставлены уплотняющие манжеты 7, выполненные из фторопласта. Внутренний диаметр манжет соответствовал диаметру контролируемого провода – 0,5 мм. Через уплотнительные манжеты 7 протягивался контролируемый провод марки ПЭТВ. Диаметр контролируемого провода – 0,5 мм. В качестве греющего источника 17 с регулируемой мощностью использовалась лампа накаливания марки РН 220–230–15–4 мощностью 15 Вт, диаметром 22 мм. В качестве термодатчика 19 был использован диод VD9, включенный в обратном направлении. В схеме регулирования мощностью греющего источника 21 были использованы постоянные резисторы R2, R3, R5 типов МЛТ, ВС-0,25, R1-МЛТ-2, R6-СП4–2М, СПО-1, конденсаторы С1-МБМ, К71–5 на напряжение не менее 160 В и транзисторы VT1 – КТ-316 Б, VT2 – КТ-315 Б. Используемые диоды VD1–VD4 имели марку КД202М, а диод VD5 – марку Д226Б. В ка-

честве термодатчика VD6 использованы *p-n*-переходы германиевого транзистора Д808А. Тиристор VS1 имел марку КУ201Л. Стабилитроны VD6, VD7, VD8 – марку Д808А. Реле К1 – импортное TSG1, с одной парой замыкающих и одной парой размыкающих контактов. Катушка реле К1 была рассчитана на напряжение 220 В. Общая максимальная мощность нагревательного элемента (не должна превышать 100 Вт при использовании тиристоров серии КУ201) – 25 Вт. К корпусу тиристора была прикручена медная пластина площадью не менее $9\ \text{см}^2$, которая выполняла роль теплового радиатора. Данная схема рассчитана на температуру $39,2\ ^\circ\text{C}$. Схема регулирования мощностью 6 греющего источника 3 обеспечивала не дискретный, а непрерывный (или «аналоговый») режим работы. Точность поддержания температуры внутри датчика составляла $\pm 0,3\ ^\circ\text{C}$.

Для сравнения галлиевого датчика с датчиком, выполненным из проводящей резины, были проведены следующие испытания. В эмалево-изолиated провод марки ПЭТВ диаметром 0,5 мм наносились искусственные дефекты протяженностью 0,1, 0,2, 0,3 и 0,4 мм. Провод с указанными размерами дефектов протягивался сначала через датчик-прототип, а потом через предлагаемый датчик. С помощью рассматриваемого датчика были надежно зарегистрированы все дефекты. Датчиком-прототипом были зарегистрированы только дефекты, протяженность которых превышала 0,3 мм. Датчик на основе проводящей резины после 200–250 контрольных проверок провода 50-метровой длины выходил из строя за счет истирания рабочего элемента. С помощью галлиевого датчика было проведено более 1000 подобных испытаний, но надежность и точность контроля изоляции проводов с его помощью оставались неизменными.

Таким образом, датчик на основе галлия имеет более высокую чувствительность (выше в 3 раза), чем датчик на основе проводящей резины, и почти на порядок более высокий срок службы и, соответственно, надежность.

Заключение

В статье рассмотрены особенности индукционного метода контроля дефектности изоляции проводов, позволяющего осуществлять контроль количества и протяженности дефектов без заземления жилы провода. Проведено обоснование причин систематической погрешности, возникающей в определении протяженности дефектов, и показан путь её устранения. Предложены критерии оценки качества изоляции проводов по двум параметрам: по количеству дефектов на единице длины провода и по их усредненной протяженности. Приведена практическая реализации способа и рассмотрен принцип работы измерителя дефектности, реализующего индукционный способ. Рассмотрены возможные варианты датчиков дефектов, приемлемые для реализации рассмотренного способа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Курбатова О.А., Павлюченко В.М. Монтаж и ремонт горных машин и электрооборудования. – Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2004. – 286 с.
2. Ямансарин И.И. Исследование эксплуатационной надежности асинхронных двигателей в условиях горно-обогатительного комбината: автореф. дис.... канд. техн. наук. – Самара, 2012. – 20 с.
3. Gupta B. Risk in surge testing of turn insulation in windings of rotating machines // Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Technology Conference. – Toronto, Canada, 2003. – P. 459–462.
4. Bellomo J.P., Castelan P., Lebey T. The effect of pulsed voltages on dielectric material properties // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – 1999. – V. 6. – № 2. – P. 20–26.
5. Bohm F.R., Nagel K., Schindler H. A new generation of wire enamel for the production of magnet wires with outstanding corona resistance // Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Technology Conference. – Toronto, Canada, 2003. – P. 109–113.
6. Bonnett A.H., Soukup G.C. Cause and analysis of stator and rotor failures in three-phase squirrel-cage induction motors // IEEE Transactions on Industry Applications. – 1992. – V. 28. – № 4. – P. 921–937.
7. Смирнов Г.В. Надежность изоляции обмоток электротехнических изделий. – Томск: Изд-во Томского государственного университета, 1990. – 192 с.
8. Применение магнитодиэлектрического композита на основе ультрадисперсного порошка никель-цинковых частиц для ресурсосберегающей технологии пропитки обмоток электрических машин / Г.В. Смирнов, О.Л. Хасанов, Д.Г. Смирнов, В.В. Полисадова, М.С. Петюкевич, З.Г. Бикбаева // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2015. – Т. 326. – № 11. – С. 106–117.
9. PDIV characteristics of twisted-pair of magnet wires with repetitive impulse voltage / K. Kimura, S. Ushirone, T. Koyanagi, M. Nikita // IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Ins. – Chicago, June 2007. – V. 14. – № 3. – P. 744–750.
10. Chapman M., Frost N., Bruetsch R. Insulation systems for rotating low-voltage machines // IEEE International Symposium on Electrical Insulation. – Toronto, Canada, 2008. – P. 257–260.
11. Похолков Ю.П., Бесперстов П.П., Пыхтин В.В. Исследование влияния технологического процесса изготовления обмоток на дефектность витковой изоляции асинхронных двигателей // Известия Томского политехнического института. – 1975. – Т. 222. – С. 52–65.
12. Leonov A.P., Redko V.V., Soldatenko E.Yu. Estimation of winding insulation resistance to the corona discharges // OP Conference Series: Materials Science and Engineering. – Toronto, Canada, 2014. – V. 66. – P. 1–5.
13. Effect of surge voltage rise time on the insulation of low voltage machines fed by PWM converters / M. Melfi, A.M.J. Sung, S. Bell, G.L. Skibinski // IEEE Transactions on Industry Applications. – 1997. – V. 1. – P. 239–246.
14. Schemmel F., Bauer K., Kaufhold M. Reliability and statistical lifetime-prognosis of motor winding insulation in low-voltage power drive systems // IEEE Electrical Insulation Magazine. – 2009. – V. 25. – № 4. – P. 6–13.
15. Stone G.C., Culbert I.M., Lloyd B.A. Stator insulation problems associated with low voltage and medium voltage PWM drives // IEEE Cement Industry Technical Conference Record. – Toronto, Canada, 2007. – P. 187–192.
16. Смирнов Г.В., Смирнов Д.Г. Физические основы неразрушающего контроля изоляции обмоток электроприводов горно-шахтного и нефтепромыслового оборудования // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 2. – С. 102–116.
17. ГОСТ ИЕС 60851-5-2011. Провода обмоточные. Методы испытаний. Ч. 5. Электрические свойства. – М.: Стандартинформ, 2014. – 19 с.
18. Датчик для непрерывного контроля электрической прочности изоляции проводов: авт. свид. СССР № 1449949; заявл. 13.02.87; опубл. 07.01.87, Бюл. № 1. – 2 с.
19. Способ контроля эмалевой изоляции проводов: пат. Рос. Федерация № 2511229; заявл. 18.06.2012; опубл. 10.04.2014, Бюл. № 10. – 18 с.
20. Датчик для непрерывного контроля изоляции проводов: пат. Рос. Федерация № 2505830; заявл. 18.06.2012; опубл. 27.01.2014, Бюл. № 3. – 11 с.
21. Оптимизация тепловых режимов в конструкциях световых приборов на полупроводниковых источниках света / А.А. Астахов, Д.Д. Каримбаев, А.О. Мисюнас, В.Г. Христюков // Доклады ТУСУРа. – 2011. – Ч. 2 – № 2 (24). – С. 81–89.

Поступила 13.10.2016 г.

Информация об авторах

Смирнов Г.В., доктор технических наук, профессор, директор Научно-исследовательского института электронного технологического оборудования и систем связи Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники.

Смирнов Д.Г., кандидат технических наук, старший научный сотрудник Научно-исследовательского института электронного технологического оборудования и систем связи Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники.

UDC 658.382.3

BASIS FOR NONDESTRUCTIVE INDUCTION CONTROL OF WINDING INSULATION OF ELECTRICAL MACHINES

Gennadiy V. Smirnov¹,
smirnov@main.tusur.ru

Dmitriy G. Smirnov¹,
smirnov@main.tusur.ru

¹ Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics,
40, Lenin Avenue, Tomsk, 634045, Russia.

The relevance of the work is caused by the fact that electric machines are used in most production processes of various industries. The failure of the electrical machine leads to a crash, shutdown and consequently to high economic cost to elimination of the results of machine failure. The results of electric machines failure is especially tangible in exploration, production and transportation of geo-resources in oil, mining, coal, chemical and other industries, as these industries are the basis of budget formation now. The reliability and safety of these machines depend on condition of winding insulation, i.e. the enamel insulation of winding wires. Thus improving control of the enamel insulation of winding wires, their quality is the critical issue.

The aim of the research is to study the possibility of using electromagnetic induction for non-destructive testing of enamel insulation of winding wires.

Research methods: electromagnetic, for generating and studying the characteristics of a signal of contact defects transducer; micrometer, to determine the geometrical sizes of defects in enamel insulation and to match them with the control results.

Results. The authors have studied the possibility of using contact sensors of defects for controlling insulation of winding wires when using the induced EMF as a signal in the controlled wire conductor. The authors developed the method of controlling the defects in enamel insulation of wires to determine the number and length of defective areas of wire moving with any variable speed in it. The scheme of defects meter was proposed and the principle of its work was considered. The authors identified the systematic error when controlling the defects length caused by the finite size of the defect sensor. The paper introduces the method of its elimination.

Key words:

Enamel insulation, defect, defect sensor, induction, leads generator, potential, pulse of defect, length, frequency, speed sensor.

REFERENCES

- Kurbatov O.A., Pavlyuchenko V.M. *Montazh i remont gornykh mashin i elektrooborudovaniya* [Installation and repair of mining machines and equipment]. Vladivostok, FESTU Publ. house, 2004. 286 p.
- Yamansarin I. *Issledovanie ekspluatatsionnoy nadezhnosti asinkhronnykh dvigateley v usloviyakh gorno-obogotitel'nogo kombinata. Autoref. Dis. Kand. nauk* [Study of the operational reliability of asynchronous engines at mining and processing plant. Cand. Diss. Abstract]. Samara, 2012. 20 p.
- Gupta B. Risk in surge testing of turn insulation in windings of rotating machines. *Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Technology Conference*. Toronto, Canada, 2003. pp. 459–462.
- Bellomo J.P., Castelan P., Lebey T. The effect of pulsed voltages on dielectric material properties. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 1999, vol. 6, no. 2, pp. 20–26.
- Bohm F.R., Nagel K., Schindler H. A new generation of wire enamel for the production of magnet wires with outstanding corona resistance. *Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Technology Conference*. Toronto, Canada, 2003. pp. 109–113.
- Bonnett A.H., Soukup G.C. Cause and analysis of stator and rotor failures in three-phase squirrel-cage induction motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1992, vol. 28, no. 4, pp. 921–937.
- Smirnov G.V. *Nadezhnost izolyatsii elektrotekhnicheskikh izdeliy* [Reliability of insulation of electrical products]. Tomsk, Tomsk University Publ., 1990. 192 p.
- Smirnov G.V., Khasanov O.L., Smirnov D.G., Polissadov V.I., Petukovich M.S., Bikbaeva Z.G. Application of magneto-electric composite based on ultrafine powder of Nickel-zinc particles for resource-saving technology of impregnation of windings of electrical machines. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2015, vol. 326, no. 11, pp. 106–117. In Rus.
- Kimura K., Ushirone S., Koyanagi T., Hikita M. PDIV characteristics of twisted-pair of magnet wires with repetitive impulse voltage. *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Ins.* Chicago, June 2007. Vol. 14, no. 3, pp. 744–750.
- Chapman M., Frost N., Bruetsch R. Insulation systems for rotating low-voltage machines. *IEEE International Symposium on Electrical Insulation* Toronto, Canada, 2008. pp. 257–260.
- Pokholkov Yu.P., Besperstov P.P., Pykhtin V.V. *Issledovanie vliyaniya tekhnologicheskogo protsessa izgotovleniya obmotok na defektnost vitkovoy izolyatsii asinkhronnykh dvigateley* [Study of the influence of technological process of manufacturing the windings on the deficiency of turn insulation of induction motors]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic Institute*, 1975, vol. 222, pp. 52–65.
- Leonov A.P., Redko V.V., Soldatenko E.Yu. Estimation of winding insulation resistance to the corona discharges. *OP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2014, vol. 66, pp. 1–5.
- Melfi M., Sung A.M.J., Bell S., Skibinski G.L. Effect of surge voltage risetime on the insulation of low voltage machines fed by PWM converters. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1997, vol. 1, pp. 239–246.
- Schemmel F., Bauer K., Kaufhold M. Reliability and statistical lifetime-prognosis of motor winding insulation in low-voltage power drive systems. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 2009, vol. 25, no. 4, pp. 6–13.
- Stone G.C., Culbert I.M., Lloyd B.A. Stator insulation problems associated with low voltage and medium voltage PWM drives.

- IEEE Cement Industry Technical Conference Record*. Toronto, Canada, 2007. pp. 187–192.
16. Smirnov G.V., Smirnov D.G. Physical basis of non-destructive control of winding insulation of electric drives of mining and oil field equipment. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 2, pp. 102–116. In Rus.
 17. *GOST IEC 60851–5-2011. Provoda obmotochnye. Metody ispytany. Ch. 5. Elektricheskie svoystva* [State standard IEC 60851–5-2011. Magnet wires. Test methods. P. 5. Electrical properties]. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 19 p.
 18. Smirnov G.V., Kosentchuk N.A., Scherb S.Schi. *Datchik dlya nepreryvnogo kontrolya elektricheskoy prochnosti isolyatsii provodov* [Sensor for continuous monitoring of dielectric strength of wire insulation]. Invention certificate USSR no. 1449949, 1987.
 19. Smirnov G.V., Smirnov D.G. *Sposob kontrolya emaievoy isolyatsii provodov* [Method of controlling wire enamel insulation]. Patent RF, no. 2511229, 2014.
 20. Smirnov G.V., Smirnov D.G. *Datchik dlya nepreryvnogo kontrolya izolyatsii provodov* [Sensor for continuous monitoring of wires insulation]. Patent RF no. 2505830, 2014.
 21. Astakhov A.A., Karimbaev D.D., Misyunas A.O., Khristykov V.G. *Optimisatsiya teplovykh rezhimov v konstruktivnykh svetovykh priborov na poluprovodnikovyykh istochnikakh sveta* [Optimization of thermal regimes in construction of lighting devices on semiconductor light source]. Reports of TUSUR, 2011, P. 2, no. 2 (24), pp. 81–89.

Received: 13 October 2016.

Information about the authors

Gennadiy V. Smirnov, Dr. Sc., professor, director, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics.

Dmitriy G. Smirnov, Cand., Sc., senior researcher, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics.