

УДК 658.382.3

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТОК ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ГОРНОШАХТНОГО И НЕФТЕПРОМЫСЛОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Смирнов Геннадий Васильевич,

доктор технических наук, профессор, директор Научно-исследовательского института электронного технологического оборудования и средств связи Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, Россия, 634045, г. Томск пр. Ленина, 40.
E-mail: smirnov@main.tusur.ru

Смирнов Дмитрий Геннадьевич,

кандидат технических наук, старший научный сотрудник Научно-исследовательского института электронного технологического оборудования и средств связи Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, Россия, 634045, г. Томск пр. Ленина, 40. E-mail: smirnov@main.tusur.ru

Актуальность работы связана с тем, что в настоящее время технологические процессы разведки, добычи, транспортировки георесурсов в нефтедобывающей, горнорудной, угольной, химической и других отраслях промышленности подвержены высокому уровню механизации и автоматизации с участием электрических машин. Надежность и безотказность работы этих машин зависят от состояния витковой изоляции, роль которой играет эмалевая изоляция обмоточных проводов, поэтому совершенствование контроля эмалевой изоляции обмоточных проводов, повышение их качества и надежности является весьма актуальным.

Цель работы: изучение физических процессов в первичном преобразователе дефектов в эмалевой изоляции для обоснования выбора конструкции указанного преобразователя, оценки и оптимизации его метрологических характеристик.

Методы исследования: осциллографический – для исследования характеристик зажигающегося между датчиком и проводом в месте дефекта разряда в воздухе; микрометры – для определения геометрических размеров дефектов в эмалевой изоляции и расстояния от датчика до границы дефектного участка; высоковольтные – для исследования характеристик разряда и его вида в промежутке между датчиком и жилой провода в дефектных местах эмаль-изоляции.

Результаты. Несмотря на значительный прогресс развития электромашиностроения в области совершенствования изоляции обмоток электрических машин, контроль дефектности изоляции на всех стадиях жизненного цикла по-прежнему остаётся актуальной научно-технической проблемой. Исследованы особенности разряда в первичном преобразователе дефектов при подходе к нему дефектного участка провода, при нахождении дефектного участка в зоне датчика и при выходе указанного участка из датчика. Приведены типичные осциллограммы тока и напряжения с первичного преобразователя дефектов при прохождении через него дефектного участка изоляции провода. Проведен анализ структуры сигналов, и рассмотрен возможный механизм и вид разряда в датчике. Выделены информационные зоны из структуры сигнала с первичного преобразователя. Рассмотрены варианты и способы снижения погрешности при контроле количества и протяженности дефектов. Разработан способ контроля дефектности эмалевой изоляции проводов, позволяющий определять количество и протяженность дефектных участков в эмаль-изоляции движущегося с любыми переменными скоростями провода. Предложена схема измерителя дефектности, рассмотрен принцип его работы, и проведена оценка его метрологических характеристик.

Ключевые слова:

Эмалевая изоляция, дефект, датчик дефектов, коронный разряд, искровой разряд, напряжение, ток разряда, импульс с дефекта, осциллограмма.

Введение

Эмалированные провода находят широкое применение в изделиях горнодобывающей, нефтедобывающей, электротехнической и электронной промышленности, для изготовления обмоток электрических машин, трансформаторов, драйверов жёстких дисков компьютеров, в современных источниках питания, коммутирующих элементах и источниках электрического тока [1].

Готовые эмалированные провода проходят многочисленные лабораторные испытания [2]. 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 [3], поэтому необходимо осуществлять контроль дефектности проводов не только на стадии их производства, но и в процессе изготовления из них намоточных изделий [4].

В настоящее время для контроля дефектности эмалевой изоляции проводов используют ГОСТ ИЕС 60851–5–2011 [5]. Указанный ГОСТ полностью идентичен международному стандарту [6] с учетом внесённых в него изменений Amd1:1997 и Amd 2:2004. В соответствии с этим документом целостность изоляции выражается числом точечных

повреждений на проводе определенной длины, зафиксированных с помощью электрического испытательного устройства. Для контроля точечных повреждений изоляции проводов используют датчик с высоким напряжением.

Недостатком является, во-первых, малая универсальность датчика, так как для проводов с диаметром жилы, лежащим в диапазоне от 0,050 до 0,25 мм, используют электрод-датчик, выполненный в виде двух роликов, и контролируемый провод протягивается через 4 ролика, два из которых являются направляющими, а два других – электродами датчика. Для проводов с диаметром, лежащим в диапазоне от 0,25 до 1,600 мм, этот датчик уже не применим, и взамен него используют один высоковольтный электрод большего диаметра.

Во-вторых, как при контроле проводов с диаметром жил, лежащим в диапазоне от 0,050 до 0,25 мм, так и при контроле проводов с диаметром 0,25 до 1,600 мм провод многократно перегибается. Это приводит к высокому механическому нагружению на изоляцию провода со стороны роликов, что вызывает не только ослабление механической и электрической прочности изоляции контролируемого провода, но и приводит к появлению в изоляции дополнительных дефектов. Поэтому при помощи датчика, используемого в [5], осуществляют только выборочный контроль при постоянной и относительно малой скорости протягивания провода, равной (275 ± 25) мм/с.

В-третьих, рассмотренные выше способы контроля дефектности не позволяют определять протяженность дефектов, которая является не менее важной характеристикой поврежденности изоляции, чем количество дефектов [7].

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

Экспериментальная часть

Для того чтобы разработать способ, который бы позволял в широком диапазоне скоростей движения провода через первичный преобразователь определять не только количество дефектов на изоляции провода, но и их протяженность, необходимо выбрать приемлемый для этих целей малоинерционный чувствительный датчик дефектов.

Для решения стоящей задачи в качестве датчика дефектов целесообразно было выбрать датчик, основанный на зажигании газового разряда, возникающего между датчиком и жилой провода в дефектном участке изоляции [8].

При приближении к датчику дефектного участка эмалевого изоляции, расположенного на движущемся проводе, условия в области, расположенной между дефектом и датчиком, могут динамически изменяться. Эти изменения могут быть обусловлены многими разнообразными факторами: переменными скоростями сближения дефекта с датчиком, непрерывно изменяющимся расстоянием между

датчиком и жилой провода в дефектном участке эмаль-изоляции, поперечными колебаниями провода относительно датчика, изменениями температуры, влажности и состава атмосферы вокруг движущегося датчика и т. д. Все это может приводить к тому, что между дефектом и датчиком может загораться тот или иной вид разряда из тех видов разрядов, которые могут быть реализованы в воздухе при атмосферном давлении. Такими разрядами могут быть коронный, кистевой, искровой, тлеющий и дуговой [9, 10].

Одной из разновидностей газового разряда, который может загораться между жилой провода в месте дефекта и датчиком дефектов, является коронный разряд [11]. Коронный разряд может развиваться только в случае резко неоднородного поля в области одного или обоих электродов воздушного промежутка. От остальных видов самостоятельных разрядов коронный разряд существенно отличается тем, что сила тока в нём обусловлена не сопротивлением внешней цепи, а ограниченной проводимостью внешней области разряда [12]. Ток коронного разряда имеет импульсный характер, частота импульсов зависит от внешних условий и от распределения напряженности электрического поля в разрядном промежутке. Следует ожидать, что по мере приближения и удаления дефектного участка из зоны действия первичного преобразователя дефектов ввиду неизбежных поперечных колебаний провода и иных причин, указанных выше, коронный разряд может оказаться нестабильным. В зоне нестабильности разряд может погасать на некоторое время, а затем загораться вновь. Коронный разряд появляется при определенном «начальном напряжении» между электродами. Дальнейшее увеличение разности потенциалов между электродами приводит к увеличению области коронирования, к нарастанию силы тока и яркости свечения коронного разряда. Затем, при определенной разности потенциалов, иногда значительно превышающей начальное напряжение, коронный разряд переходит в искровой. При уменьшении расстояния воздушного промежутка между коронирующим и не коронирующим электродами напряжение короны уменьшается, при этом уменьшается и напряжение зажигания искрового разряда. Однако напряжение зажигания искрового разряда уменьшается значительно быстрее, чем напряжение зажигания короны. При некотором критическом расстоянии между электродами корона не появляется, а сразу происходит искровой пробой воздушного промежутка [12], который, так же как и коронный разряд, носит импульсный характер.

При перемещении дефекта в сторону датчика дефектов расстояние между ними уменьшается и за счёт этого напряженность поля в месте дефекта нарастает. При некотором критическом расстоянии между датчиком и дефектом и равенстве контрольного напряжения на датчике начальному напряжению зажигания короны, в области дефекта

происходит заметное искажение электрического поля и зажигается коронный разряд. Напряжение зажигания разряда в воздухе можно рассчитать, используя таунсендовский критерий перехода несамоостоятельного разряда в самостоятельный [12]:

$$v(E) \left\{ \exp \left[\int_0^x \alpha_{эфф}(x) dx \right] - 1 \right\} \geq 1, \quad (1)$$

где $v(E)$ – коэффициент вторичной ионизации, учитывающий все возможные процессы образования вторичных электронов, каким бы механизмом они не вызывались; E – напряженность электрического поля вдоль силовых линий; $\alpha_{эфф}(x) = \alpha(x) - \eta(x)$ – эффективный коэффициент ударной ионизации; $\alpha(x)$ – коэффициент ударной ионизации, характеризующий число новых электронов, создаваемых первичным электроном при прохождении 1 см пути в направлении поля; $\eta(x)$ – коэффициент прилипания, зависящий от напряженности электрического поля, сорта и давления газа.

Критерий (1) позволяет определять начальное напряжение зажигания разряда вне зависимости от того, по какому механизму разряд будет развиваться: лавинному или стримерному.

Для определения начального напряжения зажигания разряда, кроме значений параметров, входящих в критерий (1), необходимо знать распределение напряженности электрического поля вдоль силовых линий. В большинстве случаев указанная напряженность не выражается аналитическими функциями и может быть определена только с помощью численных методов [13]. В нашем случае расчет распределения напряженности электрического поля вдоль силовых линий, при постоянно изменяющихся расстояниях между дефектом и датчиком, вызывает значительные трудности. Поэтому для решения указанной задачи на-

иболее приемлемым является путь эмпирического исследования влияния различных факторов на характеристики и стабильность разряда в области дефекта.

При проведении исследования характеристик информационного сигнала с первичного преобразователя применялся осциллографический метод с использованием двухканального цифрового осциллографа С9–8. При этом на одном канале снимались осциллограммы напряжения на датчике, а на другом – осциллограммы тока разряда. Схема экспериментальной установки по исследованию характеристик разряда в области датчика дефектов, при прохождении через него дефектного участка эмалированной изоляции, приведена на рис. 1.

Все сопротивления внешней цепи разрядного промежутка сосредоточены в сопротивлении $R1$. В емкости C сосредоточена емкость соединительных кабелей и дополнительная емкость, которую можно было изменять в экспериментах. Напряжение U из высоковольтного источника 1 через сопротивление $R1$ подается на ролик датчика (рис. 1). Через сопротивления делителя $R2$ и $R3$ напряжение с ролика подается на вход 1-го канала осциллографа. На вход 2-го канала подается сигнал разрядного тока, снимаемого с сопротивления $R4$.

В данной схеме величина зарядного сопротивления $R_{зар} = R1 + R2 + R3$, а величина разрядного сопротивления $R_{раз} = r(t) + R4$, где $r(t)$ – непрерывно изменяющееся сопротивление промежутка между датчиком и дефектом.

Методика определения напряжения зажигания разряда в зависимости от расстояния между дефектом и точкой соприкосновения датчика с эмалированной изоляцией заключалась в следующем. Через датчик, представляющий собой сменный ролик, протягивали заземленный эмалированный провод с нанесенным по окружности дефектом протяжен-

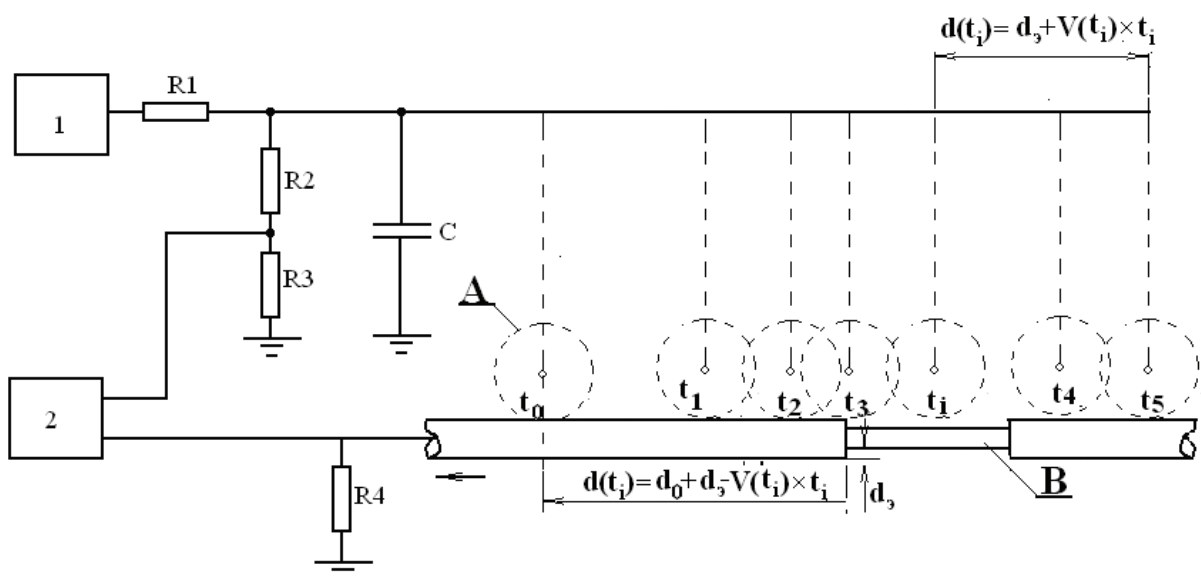


Рис. 1. Схема экспериментальной установки по исследованию характеристик разряда в области датчика дефектов

Fig. 1. Scheme of the experimental setup for studying discharge characteristics in the area of a defect sensor

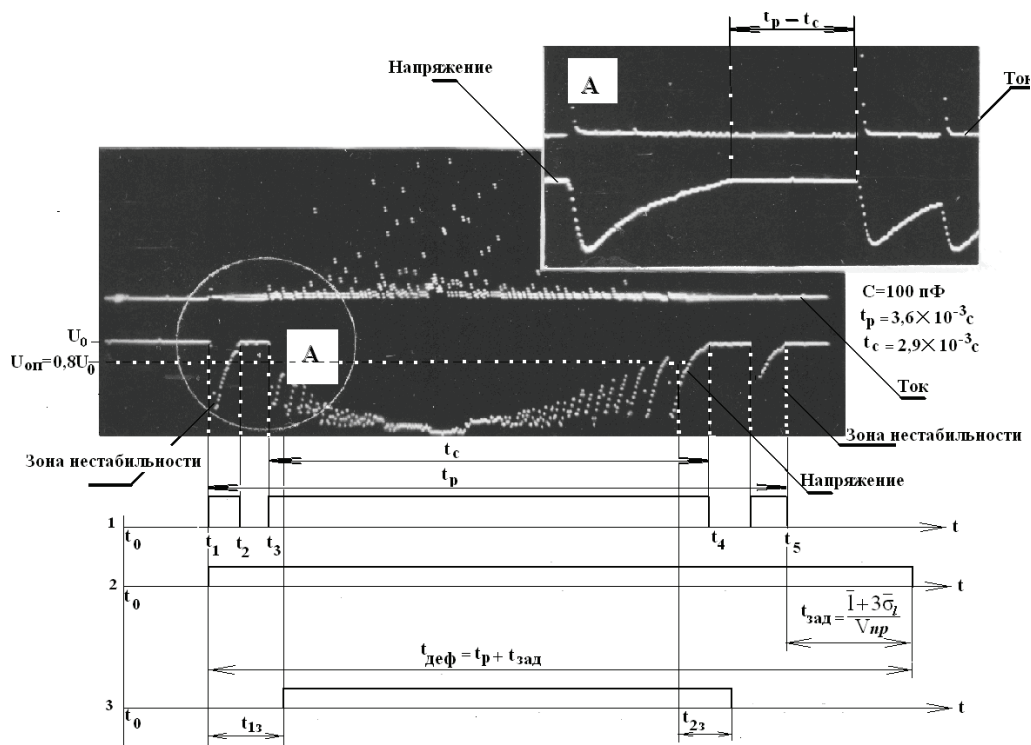


Рис. 2. Осциллограмма и эпюры сигнала с первичного преобразователя: t_p – время горения разряда при прохождении в зоне действия первичного преобразователя одного дефекта от момента зажигания разряда до момента его погасания; t_c – время стабильного горения разряда при прохождении через первичный преобразователь одного дефекта

Fig. 2. Oscillograms and diagrams of the signal from a primary converter: t_p is the time of discharge burning when passing within the range of activity of one defect primary converter from the moment of the discharge ignition until its extinction; t_c is the time of discharge stable burning when passing through the primary converter of one defect

ностью 0,5 мм. Диаметры роликов в экспериментах можно было изменять. Переднюю границу дефекта устанавливали на расстоянии 10 мм от оси датчика и с шагом 0,5 мм перемещали провод под датчиком с помощью микрометра. После каждого перемещения провода на величину 0,5 мм на датчик с высоковольтного источника через токоограничивающее сопротивление $R1$ подавалось линейно возрастающее со скоростью 500 В/с напряжение и фиксировались значения напряжений, при которых происходил разряд между датчиком и жилой провода в дефектном участке изоляции. После каждого передвижения производилось по 40 измерений при положительной и отрицательной полярностей напряжений на ролике датчика.

Процесс формирования информационного сигнала с первичного преобразователя при прохождении дефектного участка изоляции в зоне датчика дефектов можно пояснить с помощью осциллограммы и эпюр, представленных на рис. 2.

Величина t_p характеризует длительность времени между фронтами сигнала на уровне $(0,7-0,9)U_0$; U_0 – амплитудное значение сигнала.

Время t_p включает в себя время перехода коронного разряда в искровой при приближении дефекта к первичному преобразователю, и искрового в коронный – при удалении дефекта от первичного преобразователя, а также время t_c стационарного горения искрового разряда.

При движении дефекта, имеющегося в изоляции обмоточного провода, происходит непрерывное изменение расстояния между дефектом и первичным преобразователем дефектов. Если это расстояние между точкой соприкосновения датчика с поверхностью контролируемого провода и передней границей движущегося вместе с проводом дефекта в некоторый момент времени t_0 обозначить через d_0 , то при сближении дефекта с датчиком указанное расстояние будет изменяться по закону

$$d(t) = d_0 + d_0 - v_1(t)t,$$

где $d(t)$ – расстояние между дефектом и датчиком точечных повреждений в любой момент времени их сближения; d_0 – толщина эмалевой изоляции; $v_1(t)$ – скорость движения провода; t – время.

Расстояние $d(t)$ в пределе стремится к некоторому минимальному значению $d_{\min} \leq d_0$. После достижения между дефектом и датчиком минимального расстояния d_{\min} дефект начинает выходить из зоны датчика и расстояние между ними увеличивается по закону

$$d(t) = d_{\min} + v_1(t)t.$$

В общем случае при подаче напряжения U_0 на датчик точечных повреждений относительно заземленного провода поле в промежутке между дефектом А и датчиком В (рис. 1) будет неоднородным. Поэтому зазор между дефектом А и датчиком В можно представить в виде изменяющегося во

времени воздушного промежутка, образованного между двумя криволинейными электродами, одним из которых является жила провода в дефектном участке эмалевой изоляции (электрод А на рис. 1), а другим – датчик (электрод В на рис. 1).

При достаточно большом расстоянии между электродами (рис. 1, интервал времени t_0-t_1) на выходе датчика точечных повреждений находится постоянное напряжение U_0 . По мере приближения электрода А к электроду В напряженность электрического поля на электродах А и В и в промежутке между ними возрастает. При некотором положении электрода А напряженность поля в зазоре и на электродах становится достаточно высокой и начинают образовываться электронные лавины, приводящие к протеканию в указанном промежутке тока. Величину этого тока, в общем случае, можно определить, используя введенные Таунсендом коэффициенты α , β и γ , по выражению [12]

$$i = i_0 \frac{(\alpha - \beta) \exp(\alpha - \beta)d(t)}{\alpha(1 + \gamma) - (\alpha + \beta) \exp(\alpha - \beta)d(t)},$$

где $i_0 = ln_0$ – начальный ток в промежутке; l – заряд электрона; n_0 – исходное количество электронов в области катода, вызванное внешним ионизатором; α – коэффициент объемной ионизации газа электронами; β – коэффициент ионизации положительными ионами; γ – коэффициент поверхностной ионизации на катоде.

Протекание через зазор АВ тока эквивалентно тому, что внутреннее сопротивление этого зазора $r(t)$ изменяется. По мере дальнейшего сближения электродов А и В происходит дальнейшее возрастание напряженности электрического поля в зазоре, а следовательно, и коэффициентов α , β и γ , которые от нее зависят. Это приводит к еще большему падению сопротивления $r(t)$. Пусть в некоторый момент времени t_1 сопротивление зазора достигло такого значения $r(t_1)$, при котором выполняется неравенство

$$R_4 + r(t_1) < R_{\text{зар}}. \quad (2)$$

При выполнении неравенства (2) емкость C начинает разряжаться через разрядный промежуток, что приводит к изменению напряжения на выходе датчика точечных повреждений по закону, определяемому из выражения

$$\frac{dU}{dt} = \left(- \frac{U}{[R_4 + r(t)]C} \right), \quad (3)$$

где C – емкость, через которую осуществляется питание датчика.

Решив уравнение (3), получим

$$U = U_0 \exp\left(- \frac{t - t_1}{[R_4 + r(t)]C} \right).$$

По мере разрядки емкости C напряжение на промежутке падает, следовательно, в нем снижается и напряженность поля. При достижении в момент времени t_1 некоторого значения напряжения U_1 (рис. 2) процесс лавинообразования в промежут-

ке АВ прекращается и сопротивление $r(t)$ разрядного промежутка резко увеличивается. Это приводит к зарядке емкости C и к нарастанию на выходе датчика напряжения по закону

$$U = U_0(1 - e^{-t/R_{\text{зар}}C}).$$

Процесс нарастания напряжения на датчике точечных повреждений может оборваться в некоторый момент времени t_2 , а затем в момент времени t_3 зажегся снова. Такой колебательный процесс будет продолжаться в течение некоторого времени (t_1-t_3).

Образование лавин в интервале времен (t_0-t_3) носит неустойчивый характер, что зависит от множества разнообразных факторов (наличия свободных электронов в промежутке, созданных радиационным излучением, поперечных колебаний провода относительно датчика, наличия загрязнений на дефекте и т. д.). В силу этих факторов колебательный процесс в датчике может в любой момент времени оборваться, а затем, спустя некоторое время, начаться снова. Таких колебательных неустойчивых зон при перемещении дефекта к датчику может быть несколько. Их количество статистически изменяется от дефекта к дефекту и зависит, помимо прочих факторов, от скорости движения провода. При медленном движении провода таких зон обычно больше, чем при его более быстром движении. При достаточно высоких скоростях движения провода неустойчивый процесс может плавно, без разрывов во времени, перейти в более устойчивый колебательный процесс, а разряд – в самостоятельный. Назовем зону несамостоятельного разряда «зоной нестабильности» и поведение сигнала с датчика в этой зоне проанализируем ниже.

Рассмотрим переход несамостоятельного разряда в самостоятельный разряд.

При дальнейшем движении электрода А (рис. 1) в некоторый момент времени t_3 напряженность поля в зазоре достигнет некоторого критического значения и зажжется самостоятельный разряд. Условия самостоятельности разряда, в соответствии с [12], можно записать в виде

$$\mu = \gamma[\exp(\alpha d(t)) - 1] = 1,$$

где $d(t_i)$ – расстояние между дефектом и датчиком в момент времени t_i .

При зажигании в промежутке самостоятельного разряда сигнал на выходе датчика точечных повреждений вновь будет носить колебательный характер, причем амплитуда, до которой будет периодически заряжаться конденсатор C , со временем будет снижаться.

Снижение амплитуды сигнала обусловлено непрерывным уменьшением зазора между электродами А и В и, следовательно, непрерывным возрастанием напряженности электрического поля на электродах и в разрядном промежутке. По мере протекания самостоятельного разряда в зазоре накапливается объемный заряд ионов. Поэтому коронный разряд переходит в кистевой, а затем в искровой разряд. Переход разряда в искровую форму с позиции стримерной теории осуществляется в со-

ответствии с [14] при выполнении следующих условий:

- должно существовать определенное соотношение между полем лавины и полем разряда, созданным электродами;
- головка лавины должна излучать количество фотонов, достаточное для поддержания и распространения стримера.

В математической форме эти условия принимают вид

$$E = E_1, N_i \geq N_{i0} = 7 \cdot 10^{11} \text{ ион/см}^3,$$

где E – напряженность поля между электродами; E_1 – напряженность поля, созданного положительными ионами в головке лавины; N_i – концентрация ионов в головке лавины; N_{i0} – предельное значение концентрации ионов в головке лавины.

Пусть указанные выше условия выполняются в момент времени t_3 (рис. 2). Начиная с этого момента времени коронный разряд переходит в искровой, который характеризуется относительно высокой стабильностью процессов. Однако амплитуда заряда емкости C в период дальнейшего приближения дефекта к датчику непрерывно и монотонно снижается.

Процесс монотонного снижения амплитудного значения сигнала (рис. 2), заключенного между временами $(t_3 - t_i)$, можно объяснить на основе закона Пашена [15], отражающего зависимость напряжения искрового разряда в воздухе от произведения межэлектродного расстояния d на давление газов p .

При движении дефекта к датчику точечных повреждений величина указанного произведения соответствует напряжению зажигания разряда правой ветви кривой Пашена. Снижение амплитудного значения напряжения зажигания искро-

вого разряда будет происходить до тех пор, пока произведение $Pd(t)$ не достигнет значений, лежащих в диапазоне $(0,3 - 2,0)$ см·мм рт. ст. В соответствии с рис. 1 и 2 указанное значение произведения давления на расстояние между первичным преобразователем и дефектом достигается в интервале времен $(t_3 - t_i)$. В данном интервале величина напряжения зажигания разряда, в соответствии с кривой Пашена, достигнет своего минимума [15].

С момента времени t_i дефект начинает удаляться от датчика, зазор между ними возрастает и напряжение зажигания разряда повышается в соответствии с правой ветвью кривой Пашена. Разряд в интервале времен $(t_i - t_5)$ из искрового разряда переходит в кистевой, коронный, а затем в самостоятельный разряд [16–20].

При смене полярности потенциала на первичном преобразователе характер сигнала с первичного преобразователя не изменяется. Однако при отрицательной полярности сигнала передний и задний фронты становятся более выраженными, амплитуда колебаний на плато сигнала уменьшается. Это можно объяснить тем, что при отрицательной полярности датчика дефектов наиболее искаженное поле наблюдается в области дефекта, который исполняет роль анода. Поэтому процесс образования электронных лавин и объемного заряда в этом случае происходит более интенсивно, чем при обратной полярности на электродах.

На рис. 3 приведены снятые зависимости разрядного напряжения промежутка между границей дефекта и точкой соприкосновения ролика с проводом для различных диаметров ролика при положительной (А) и отрицательной (В) полярности напряжения на ролике. Диаметр ролика: 1) 6; 2) 13; 3) 16 мм

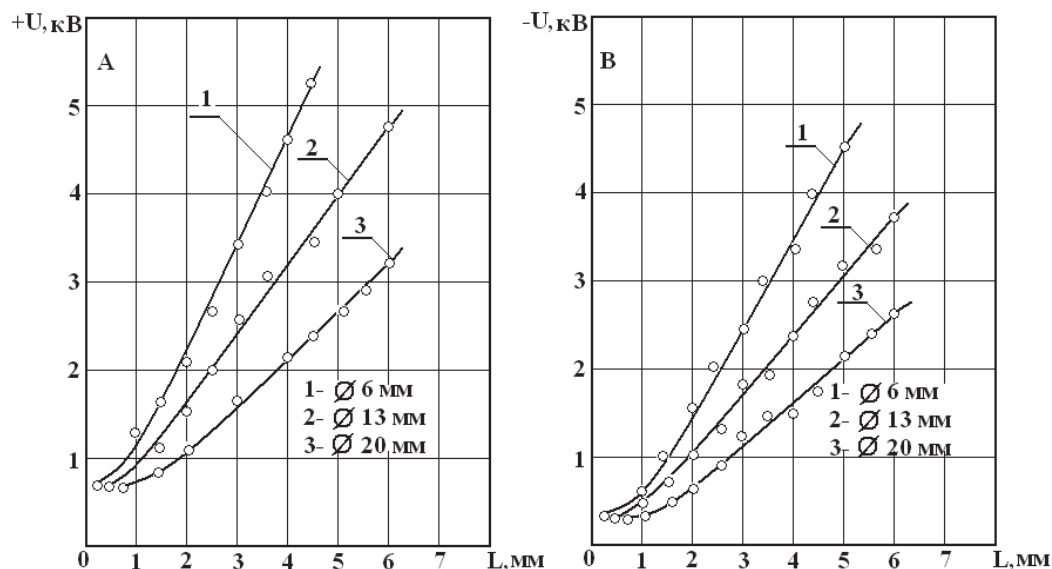


Рис. 3. Графики зависимости разрядных напряжений от расстояния между границей дефекта и точкой соприкосновения ролика с проводом для различных диаметров ролика при положительной (А) и отрицательной (В) полярности напряжения на ролике. Диаметр ролика: 1) 6; 2) 13; 3) 16 мм

Fig. 3. Diagram of discharge voltage dependence on the distance between the defect border and a contact point of the roller with the wire for different diameters of the roller with positive (A) and negative (B) voltage polarity on the roller. Roller diameter: 1) 6; 2) 13; 3) 16 mm

На рис. 3 видно, что указанные выше зависимости носят нелинейный характер, а крутизна характеристики зависит от диаметра провода. Исследования показали, что для контроля дефектности предпочтительнее выбрать отрицательную полярность напряжения на датчике дефектов, так как сигнал дефекта в этом случае четче, а напряжение контроля ниже, чем при обратной полярности напряжения на датчике.

Практическая реализация экспериментальных результатов

С учетом проведенного выше анализа процессов, происходящих в первичном преобразователе, была разработана его конструкция, приведенная на рис. 4.

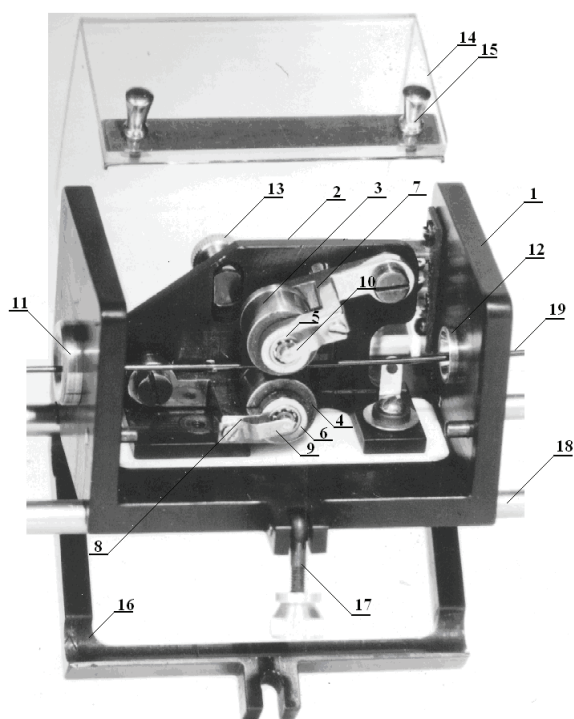


Рис. 4. Первичный преобразователь дефектов: 1 – корпус датчика; 2 – основа для крепления рабочих элементов датчика; 3 и 4 – два свободно вращающихся ролика, выполненных из нержавеющей стали; 5 и 6 – подшипники; 7 и 8 – коромысла; 9 и 10 – скользящие контакты; 11 и 12 – направляющие втулки; 13 – концевой выключатель; 14 – изоляционная крышка; 15 – фиксаторы крышки; 16 – платформа датчика; 17 – элемент крепления датчика; 18 – рама для крепления датчика; 19 – контролируемый провод

Fig. 4. The primary defect converter: 1 is the sensor case; 2 is the base for fixing the working elements of the sensor; 3, 4 are two freely rotating rollers made of stainless steel; 5, 6 are the bearings; 7, 8 are the rocker arms; 9, 10 are the sliding contacts; 11, 12 are the guide bushes; 13 is the switch; 14 is the insulator cover; 15 is the cover locks; 16 is the sensor platform; 17 is the sensor mounting block; 18 is the frame for mounting the sensor; 19 is the controlled wire

Датчик представляет собой два цилиндрических электрода 3 и 4. Electroды через подшипники 5 и 6 размещаются на осях, которые закреплены на подвижных рычагах (коромыслах) 7 и 8, позволяющих электродам-роликам совершать вертикальные перемещения синхронно с колебаниями провода. Electroды поджимаются друг к другу при помощи пластинчатых пружин, действующих на коромысла. Напряжение к электродам подводится через скользящие контакты 9 и 10. Источник питания к датчикам подключается через контакты концевой выключателя 13, которые замыкаются при закрытии изоляционной крышки 14 и размыкаются при её открывании. Крышка 14 прикрепляется к основанию корпуса 1 шарнирами, расположенными вблизи торцов одной из её стенок, а при закрывании крышки – фиксируется в закрытом положении зажимом 17.

Для обеспечения метрологических характеристик создаваемых способов и средств контроля дефектов и их геометрических размеров в изоляции обмоточных проводов необходимо учесть все выявленные и перечисленные выше положения.

Рабочими элементами датчика являются два свободно вращающихся ролика 3 и 4. Питательное напряжение U_0 подается на оси роликов при помощи скользящих контактов 9 и 10, которые через токоограничительное сопротивление подключаются к источнику высокого напряжения (ИВН) и к делителю напряжения. При входе дефекта в зону датчика дефектов между жилой провода в месте дефекта изоляции и рабочими элементами датчика (роликками 3 и 4) загорается тот или иной вид разряда, приводящий к падению напряжения на датчике. Полученный импульсный сигнал снимается с низковольтного плеча делителя и подается в измерительную схему.

Для регистрации количества дефектов на изоляции контролируемого провода необходимо, чтобы на каждый дефект с выхода первичного преобразователя был сформирован один импульс. Если сигнал с первичного преобразователя оставить в неизменном виде, то, в силу импульсной формы искрового разряда, счетчик дефектов регистрирует вместо одного дефекта n ложных дефектов, равных количеству импульсов искрового разряда в сигнале. Чтобы этого не происходило, нужно сформировать огибающую сигнала. Это можно было бы сделать путем установления на выходе первичного преобразователя фильтра с постоянной времени интегрирования τ [15]. Однако в силу присутствия нестабильных зон искрового разряда в сигнале с датчика дефектов при низких скоростях движения провода с одного дефекта может быть сформировано такое количество импульсов n_1 , сколько раз пауза между импульсами искрового разряда превышает постоянную времени τ фильтра (см. рис. 2, эпюра 1). Величина погрешности в подсчете дефектов в этом случае может составлять 300, 400 и более %. При высоких скоростях движения провода $V_{пр}$ ухудшается разрешающая способность контро-

ля. При этом длина участков провода $l_{пр} = V_{пр} \tau$, следующих за каждым дефектом, остается не проконтролируемой. Если на этих участках расположено сколь угодно много дефектов или дефекты расположены на расстояниях меньше $l_{пр}$, все они будут зарегистрированы как один дефект. Так как с возрастанием скорости провода длина не проконтролируемых участков возрастает, то, соответственно, увеличивается и погрешность в определении количества дефектов на изоляции контролируемого провода. При определенных условиях эта погрешность может быть сколь угодно большой.

Эти недостатки устранены в предложенном нами способе [21]. Сущность этого решения заключается в следующем. По первому импульсу искрового разряда формируется передний фронт импульса дефекта. Задний фронт импульса дефекта после последнего импульса искрового разряда формируется с задержкой на время t_a (рис. 2, эпюра 2)

$$t_a = \frac{\bar{l} + 3\sigma_1}{V_{пр}}, \quad (4)$$

где \bar{l} – среднестатистический отрезок провода, который проходит через датчик дефектов за паузу между импульсами искрового разряда в зоне его неустойчивого горения; σ_1 – среднестатистическое отклонение отрезка провода l от среднего значения \bar{l} .

Такое решение позволяет сохранить строго фиксированную длину не проконтролируемого участка провода $\bar{l} + 3\sigma_1$, следующего за каждым дефектом. Величина этого участка не зависит от скорости движения провода и может быть пренебрежительно малой, что существенно повышает точность контроля количества дефектов.

Структурная схема измерителя дефектности представлена на рис. 5.

В исходном состоянии при отсутствии дефекта на изоляции провода ИВН вырабатывает высокое постоянное напряжение U_0 , которое через токоограничительное сопротивление, находящееся в ИВН, подается на ДД. Напряжение на ДД, пониженное на делителе напряжения, подается на вход ДУ. При движении провода датчик скорости ДС вырабатывает импульсы скорости, частота которых пропорциональна скорости движения провода. Эти импульсы поступают на вход ФИС, где происходит формирование их по напряжению и крутизне фронтов. Сформированные импульсы скорости поступают на управляющий вход ФИД. При подходе передней границы дефекта к ДД зажигается искровой разряд. Сигнал на ДД при зажигании искрового разряда имеет вид, изображенный на осциллограмме рис. 2. Импульсы искрового разряда, пониженные на делителе, поступают на инвертирующий вход ДУ. На неинвертирующий вход ДУ подаются импульсы с ИОН. опорное напряжение устанавливается на уровне $(0,7-0,8)U_0$. ДУ усиливает сигналы с делителя напряжения относительно опорного напряжения и инвертирует их. С вы-

хода ДУ положительные импульсы поступают в ФФ, на управляющий вход которого поступают импульсы скорости с ФИС. Период следования импульсов скорости равен времени прохождения через ДД строго фиксированной элементарной длины провода l_3 . По первому положительному импульсу с выхода ДУ в ФФ формируется передний фронт импульса дефекта. Задний фронт импульса дефекта формируется только через время t_a после последнего импульса искрового разряда (см. рис. 2, эпюра 2). Время t_a задается временем прихода m количества импульсов скорости из условия

$$t_a = \frac{ml_a}{V_{пр}} \geq \frac{\bar{l} + 3\sigma_1}{V_{пр}}. \quad (5)$$

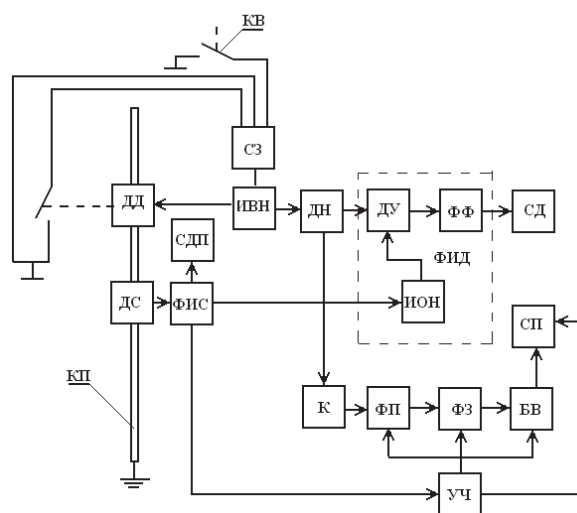


Рис. 5. Структурная схема измерителя дефектности: ДД – датчик дефектов; ДС – датчик скорости; КВ – конечный выключатель; КП – контролируемый провод; СЗ – схема защиты; ИВН – источник высокого напряжения; УМ – умножитель частоты; ФИС – формирователь импульсов скорости; ФИД – формирователь импульса дефекта; ИОН – источник опорного напряжения; СДП – счетчик длины провода; СД – счетчик протяженности дефектов; СД – счетчик количества дефектов; ДН – делитель напряжения; ДУ – дифференциальный усилитель; К – компаратор; ФП – формирователь переднего фронта; ФЗ – формирователь заднего фронта; БВ – блок вычитания; ФИД содержит ИОН, ДУ, ФП и ФЗ

Fig. 5. Structural diagram of the defectiveness meter: ДД is the defect sensor; ДС is the speed sensor; КВ (LS) is the limit switch; КП (CW) is the controlled wire; СЗ (PS) is the protection scheme; ИВН (HVS) is the high voltage source; УМ (FM) is the frequency multiplier; ФИС (SPS) is the speed pulse shaper; ФИД (DPS) is defect pulse shaper; ИОН (SRV) is the source of reference voltage; СДП (WLC) is the wire length counter; СД (DLC) is the defects length counter; СД – счетчик количества дефектов; ДН (VD) is the voltage divider; ДУ (DA) is the differential amplifier; К is the comparator; ФП (LES) is the leading edge shaper; ФЗ (TES) is the trailing edge shaper; БВ (SB) is the subtraction block; t DPS contains SRV, DA, LES and TES

Как следует из выражения (5), время задержки не остается постоянной величиной от дефекта к дефекту, а изменяется обратно пропорционально скорости провода. Однако длина отрезка провода, прошедшего через датчик дефектов за время t_3 , остается неизменной, независимо от того, с какой скоростью перемещается провод.

Таким образом, задний фронт импульса дефекта формируется в том случае, если после окончания последнего импульса на входе ДУ на управляющий вход ФФ пришло m импульсов скорости, количество которых определяет время задержки. Сформированный импульс регистрируется в СД. Так как величина ml_3 больше или равна максимально возможной длине провода $l+3\sigma_1$, проходящей за время паузы между импульсами искрового разряда в зоне нестабильности, то это исключает ложный подсчет количества дефектов.

Геометрические размеры дефектов в эмалевой изоляции проводов дают не менее важную информацию о состоянии изоляции провода, чем количество дефектов.

Как показал анализ особенностей сигнала с первичного преобразователя, при прохождении через него дефектного участка изоляции провода, протяженность дефекта оказывает влияние только на длительность зоны самостоятельного разряда. Поэтому её нужно выделить из сигнала с первичного преобразователя и извлечь количественную информацию о протяженности дефекта. Для того чтобы выделить указанную зону самостоятельного разряда, задаются определенной величиной опорного сигнала $U_{оп}$ из условия: $U_{оп}=(0,7-0,9)U_0$, где U_0 – исходное напряжение на датчике дефектов при отсутствии в зоне его действия дефектов.

При подходе дефекта к датчику дефектов зажигается искровой разряд, и рабочее напряжение U_p на датчике начинает снижаться. Выбранное из указанного выше соотношения опорное напряжение $U_{оп}$ постоянно сравнивается со значением рабочего напряжения U_p . Выполнение неравенства $U_{оп} \geq U_p$ свидетельствует о том, что дефект находится в зоне датчика. Однако для исключения зоны нестабильности передний фронт импульса дефекта формируется не сразу, в момент $U_{оп}=U_p$, а с некоторой задержкой во времени t_{13} (рис. 2, эпюра 3). Время t_{13} выбирается несколько большим длительности одного импульса искрового разряда. Это позволяет исключить зоны нестабильности искрового разряда. Выполнение неравенства $U_{оп} \geq U_p$ по истечении времени t_{13} свидетельствует о том, что между датчиком и дефектом зажегся самостоятельный разряд. При выходе задней границы из зоны датчика дефектов неравенство принимает вид $U_{оп} \leq U_p$. Однако момент нового выполнения равенства $U_{оп}=U_p$ после сформированного переднего фронта импульса дефекта ещё не является свидетельством тому, что стабильное горение искрового разряда закончено. Такое равенство может возникнуть и в зоне стабильности разряда на плато в центральной части сигнала с первичного преобразователя. Поэ-

тому задний фронт импульса дефекта формируется с некоторой задержкой t_{23} (рис. 2, эпюра 3) относительно момента выполнения равенства $U_{оп}=U_p$. Выражение для определения времени задержки t_{23} аналогично формуле (5), только в него вместо величин l и $3\sigma_1$ необходимо подставить $l_{ст}$ и $3\sigma_{ст}$, характеризующие параметры нормального закона распределения участка провода, проходящего через датчик за время $t=t_p-t_c$ (см. рис. 2). Введение времени задержки t_{23} позволяет исключить ложное формирование заднего фронта на участке возможных флуктуаций сигнала, иногда возникающих при входе и выходе дефекта из зоны датчика, и правильно сформировать задний фронт импульса протяженности дефекта по окончании зоны стабильности.

Рассмотрим, как реализуется в измерителе контроль протяженности дефектов. Сигнал с ДД поступает на вход К, где его амплитуда сравнивается с $U_{оп}$ на ДН. На выходе К появляется положительный потенциал, если $U_{оп} \leq U_p$. Использование ДН и К позволяет разделить сигнал с ДД: уровень «1» на входе К соответствует отсутствию сигнала дефекта; импульсный сигнал – приближению или удалению дефекта от ДД; уровень «0» – прохождению дефекта через ДД. Формирователи ФП позволяют исключить зоны отсутствия дефектов из нестабильной зоны сигнала при приближении дефекта к ДД. ФЗ дает возможность исключить из импульса дефекта зону нестабильности при удалении дефекта от ДД, а также отдельные участки в зоне стабильности, на которых амплитуда импульсов с ДД превышает $U_{оп}$ на ДН.

Рассмотрим, как получают количественную информацию из сформированного импульса о протяженности дефекта. С выхода ДС генерируются импульсы скорости. Генерация импульсов скорости осуществляется следующим образом. На боковой поверхности дискообразного датчика скорости нанесены прорези с равномерным шагом, равным размеру прорези. При движении провода диск начинает вращаться и с помощью фотодиодов, установленных на уровне отверстий, происходит формирование импульсов. За длительность одного импульса под датчиком проходит постоянный отрезок провода, равный $l_c = \frac{\pi D}{2M}$, где D – диаметр блока скорости; M – количество отверстий на его боковой поверхности. Так как протяженность дефектов мала, то точность её измерения с помощью импульсов скорости будет тем выше, чем меньше длина l_c . Уменьшения величины l_c можно добиться снижением диаметра D или увеличением количества отверстий M . В связи с тем, что как при снижении D , так и при увеличении M размеры прорезей на боковой поверхности датчика должны снижаться, то возможность уменьшения l_c весьма ограничена. С помощью фотолитографии нам удалось при диаметре диска 19,1 мм выполнить 170 прорезей на боковой поверхности диска, что позволило получить $l_c=0,25$ мм. При такой вели-

чине l_c может быть измерена протяженность только таких дефектов, размеры которых больше l_c , и то с очень большой погрешностью. Поэтому для уменьшения l_c в измеритель введен умножитель частоты, принцип работы которого заключается в следующем. При приходе на вход счетчика, расположенного в блоке формирования импульсов скорости, переднего фронта импульса с датчика скорости импульс начинает заполняться N_1 импульсами с частотой $f_1=1$ МГц. По приходу переднего фронта импульса с датчика скорости счетчик обнуляется. Одновременно эти N_1 импульсов поступают в схему формирования импульсов скорости, где начинают вычитаться с частотой f_2 . Эта процедура повторяется до тех пор, пока со счетчика не придут новые N_1^* импульсов, заполнивших следующий импульс с датчика скорости. Таким образом, на один импульс с датчика скорости появляется

$$K_y = \frac{f_2}{f_1} \text{ импульсов с формирователя импульсов}$$

скорости. При этом за длительность одного сформированного импульса скорости под датчиком пройдет элементарный отрезок провода l_3 :

$$l_3 = \frac{\pi D}{K_y M} = 0,25 / 10 = 0,025 \text{ мм}$$

В силу пропорциональной зависимости частоты импульсов с УЧ от скорости провода величина l_3 остается неизменной, независимо от того, с какой скоростью движется провод. Протяженность l_3 принята за единицу измерения протяженности дефекта. Подсчет количества импульсов скорости n в СП за период сформированного импульса дефекта позволяет определить протяженность дефекта l_i по формуле

$$l_i = l_3 n. \quad (6)$$

Расчетная часть

Результирующая погрешность определения количества дефектов на контролируемом проводе включает в себя погрешность, обусловленную нестабильностью искрового разряда при подходе и выходе дефекта из зоны первичного преобразователя, погрешность из-за наличия пауз между импульсами коронного или искрового разряда в зоне его нестабильного горения, погрешность, определяемую разрешающей способностью датчика дефектов.

Методическая погрешность контроля количества дефектов из-за нестабильности искрового разряда устраняется принципом формирования импульса дефекта, по которому передний фронт этого импульса формируется по первому импульсу искрового разряда, а задний – с задержкой на время t_3 после последнего импульса искрового разряда.

Погрешность определения количества дефектов из-за наличия пауз между импульсами искрового разряда является мультипликативной случайной методической погрешностью и может быть очень высокой, если для её уменьшения не при-

нять соответствующих мер. Появление этой ошибки происходит из-за того, что серии импульсов искрового разряда в зоне его нестабильного горения разделены паузами, поэтому с каждой серии может быть ложно сформирован один импульс дефекта. При среднестатистическом количестве пауз $m=3$ в сигнале одного дефекта будет сформировано 4 импульса дефекта, которые будут зарегистрированы в счетчике. Относительная погрешность при этом составит 300 %. Эта погрешность уменьшена путем введения в прибор времени задержки формирования заднего фронта импульса дефекта на время t_3 .

При введении времени t_3 возможны два вида ошибок. Первая ошибка может возникнуть в том случае, если длительность паузы окажется больше времени задержки. Статистические исследования показали, что длина отрезка провода, проходящего через датчик дефектов за паузу между сериями импульсов искрового разряда, распределяется по нормальному закону с параметрами $\bar{l}=0,5$ мм, $\sigma=0,1$ мм. Если выбрать время задержки из условия (4), то при достаточно большой выборке при определении l и 3σ вероятность того, что время задержки окажется меньше длительности паузы, будет пренебрежительно мала, следовательно, ложное формирование импульса дефекта можно исключить. При объеме выборки $N=300$ измерений, используемой нами при определении величин l и

3σ , установление времени задержки $t_3 = \frac{\bar{l} + 6\sigma}{v(t)}$ де-

лает вероятность P_1 ложного счета импульсов, обусловленную указанной выше причиной, равной нулю. При этом абсолютная погрешность $\Delta_1 n$ ложного счета дефектов, обусловленная указанной причиной, также будет равна нулю.

Вторая ошибка обусловлена тем, что расстояние между двумя соседними дефектами окажется меньше, чем $l = \bar{l}_3 + 6\sigma$, и эти два дефекта будут засчитаны как один дефект. Поскольку распределение расстояний между дефектами может быть описано стационарным пуассоновским потоком [22], то вероятность P_2 того, что расстояние между дефектами окажется меньше величины $l = \bar{l}_3 + 6\sigma$, будет равна:

$$P_2 = 1 - \exp[-\lambda(\bar{l}_3 + 6\sigma)], \quad (7)$$

где $\lambda = \frac{n}{l_{np}}$ – плотность потока, равная отношению

количества дефектов n , находящихся на контролируемом проводе, к длине l_{np} этого провода.

Абсолютная погрешность в определении количества дефектов $\Delta_2 n$, обусловленная второй ошибкой, будет равна:

$$\Delta_2 n = P_2(n-1). \quad (8)$$

Погрешность в определении количества дефектов $\Delta_3 n$, обусловленная разрешающей способностью датчика дефектов, находится аналогично, только для определения вероятности P_3 того, что

расстояние между дефектами окажется меньше зоны разрешения датчика дефектов, в формулу (7) нужно поставить вместо $l=l_3+6\sigma$ величину $l_{\min}=8$ мм.

Для определения результирующей погрешности применим энтропийный подход, предложенный К. Шенноном [23]. Для этого установим взаимосвязь между энтропийным интервалом Δ_3 неопределенности и среднестатистическим отклонением энтропийной погрешности σ_3 .

Согласно Шеннону, количество информации I определяется как разность энтропий: $I=H(n)-H(n/n_n)$, где $H(n)$ – энтропия (мера неопределенности) измеряемой величины количества дефектов n до её измерения, а $H(n/n_n)$ – энтропия действительного значения n вокруг полученного после измерения n_n , т. е. энтропия погрешности измерения.

Энтропия погрешности для закона Пуассона $H(n/n_n)$ равна:

$$\begin{aligned} H(n/n_n) &= \int_{-\infty}^{\infty} (\ln \lambda - \lambda l) \lambda l^{-\lambda} dl = \\ &= -\ln \lambda \int_{-\infty}^{\infty} \lambda l^{-\lambda} dl + \lambda \int_{-\infty}^{\infty} l \lambda l^{-\lambda} dl. \end{aligned} \quad (9)$$

Первый интеграл, стоящий в правой части (9), равен 1, а второй – математическому ожиданию m_n . Так как для показательного закона $m_n = \frac{1}{\lambda}$, а дисперсия $D^2 = \frac{1}{\lambda^2}$, то можно записать:

$$H(n/n_n) = l \ln \sigma = 2\Delta_3. \quad (10)$$

Из (10) следует, что энтропийная погрешность $\Delta_3 = 1,2\sigma_3$. Среднестатистические отклонения погрешностей $\sigma_2 = \frac{\Delta_2 n}{1,2}$. Ошибки $\Delta_2 n$ и $\Delta_3 n$ не коррелируют между собой, так как они вызваны разными причинами. Поэтому среднестатистическое отклонение результирующей погрешности будет определяться выражением

$$\sigma = \sqrt{\sigma_2^2 + \sigma_3^2}.$$

Примем, что результирующая погрешность распределена по закону Пуассона. Поскольку она является мультипликативной, то погрешность чувствительности γ_2 является постоянной величиной и её можно определить при любом значении N . Среднестатистическое количество дефектов на проводе $l_{\text{пр}}=60$ м, зарегистрированное в процессе намотки обмоток, составляло $N_{\text{ср}}=80$ дефектов, при этом $\lambda_{\text{ср}}=1,33 \cdot 10^{-3}$ деф/мм, $F_2=1,33 \cdot 10^{-3}$, $\Delta_2 N=0,1$, $F_3=1,06 \cdot 10^{-2}$; $\Delta_2 N=0,85$, $\sigma=0,1$, $\gamma_s=1,06$. Таким образом, класс точности созданного измерителя дефектности – 1,0.

Проведем анализ и оценку погрешностей, возникающих при контроле протяженности дефектов. Интегральная протяженность дефекта на контролируемом проводе по принципу, заложенному в основу её регистрации, определяется выражением (6).

Результирующая погрешность определения протяженности дефектов складывается из ошибки, обусловленной принципом определения $l_{\text{дл}}$, ошибки, связанной с присутствием зоны нестабильности коронного разряда и зоны реакции датчика на дефект, а также ошибки схемы обработки сигнала дефекта.

Ошибка, связанная с принципом определения $l_{\text{дл}}$, является аддитивной случайной погрешностью квантования. При подсчете количества импульсов n_i в счетчике протяженности дефектов может возникнуть ошибка на ± 1 импульс в начале и в конце импульса протяженности дефектов. Этому количеству импульсов соответствует интервал неопределенности $\Delta_1 l_{\text{дл}} = \pm l_3 = \pm 0,025$ мм. Так как дефекты могут иметь любые протяженности, то ошибка, обусловленная указанной причиной, распределена внутри интервала от 0 до $\pm l_3$ по равномерному за-

$$\text{кону и поэтому } \sigma_{l_i} = \frac{\Delta_1 l_i}{\sqrt{3}} = \frac{0,025}{1,73} = 1,44 \cdot 10^{-2} \text{ мм.}$$

При подсчете количества импульсов скорости n_i в счетчике протяженности дефектов СП присутствуют систематические ошибки, связанные с временами t_{13} и t_{23} , а также с разрешающей способностью ДД. Систематические ошибки, обусловленные временами t_{13} и t_{23} , устраняются путем прибавления к n импульсов m_1 и вычитания импульсов m_2 , опре-

$$\text{деляемых из выражений: } m_1 = \frac{l_1}{l_3}, \quad m_2 = \frac{l_{\text{ст}} + 3\sigma_{\text{ст}}}{l_3},$$

где $l_{\text{ст}}$ – длина участка провода, прошедшего при максимальной скорости провода через ДД за период одного импульса искрового разряда.

Систематическая ошибка, связанная с разрешающей способностью ДД, вскрыта в [9]. Сущность её появления обусловлена следующим. Допустим, через датчик ДД проходит точечный дефект пренебрежительно малой протяженности. За время сформированного импульса дефекта в счетчик протяженности дефекта СП пройдет m_3 импульсов скорости с УЧ. Этот счет дает ложное представление о протяженности бесконечно малого дефекта и его нужно исключить. Величина m_3 определяется экспериментально и вычитается наряду с m_1 и m_2 в блоке вычитания БВ. На выходе БВ появляется импульс только после прихода в него после сформированного переднего фронта импульса дефекта количества импульсов скорости $m = -m_1 + m_2 + m_3$. Импульс на выходе БВ открывает СП и разрешает подсчет импульсов скорости. За счёт этого из n импульсов скорости, укладываемых в длительность сформированного импульса дефекта, в счетчик СП проходит только $n_i = n - m$ импульсов, по количеству которых и определяется протяженность l -го дефекта.

Погрешность, связанная с присутствием зоны нестабильности коронного разряда и зоны реакции датчика на дефект, относится к методической аддитивной погрешности. Она устранена введением задержки времени формирования переднего и за-

днего фронтов импульса протяженности дефекта и схемы обработки сигнала протяженности дефекта.

Ошибка схемы обработки сигнала протяженности дефекта является аддитивной погрешностью квантования. Она обусловлена тем, что в схеме вычитания, введенной в измеритель протяженности дефекта, возможна ошибка вычитания 1 импульс.

Абсолютная величина $\Delta_3 l_i$ закона распределения и среднеквадратическая величина σ_3 этой погрешности полностью аналогичны закону и величинам $\Delta_1 l_i$, однако их нельзя считать коррелированными ошибками, так как их источником являются разные причины.

Таким образом, результирующая погрешность определения протяженности дефектов Δl_p является аддитивной и равной 0,035 мм. Так как счетчик протяженности дефектов способен зарегистрировать 999 импульсов с умножителя частоты, что соответствует пределу шкалы $l_n=24,9$ мм, то приведенная погрешность в определении протяженности дефектов $\gamma_n=0,14$ %. По правилу округления погрешности и определению класса точности прибора, он (класс точности) может быть принят равным 0,15.

Заключение

Дефектность изоляции обмоточных проводов является очень важной характеристикой, определяющей

показатели надежности и долговечности обмоток электрических машин [24], поэтому разработка измерителей дефектности, позволяющих контролировать дефектность в широком диапазоне скоростей движения проводов, например при намотке обмоток, имеет важное практическое значение.

В статье рассмотрены особенности характеристик первичного преобразователя дефектов в изоляции обмоточных проводов, основанного на заيجании разряда в воздухе. Показано, что информационный сигнал первичного преобразователя, при прохождении через него дефектного участка изоляции провода, носит сложный характер. Проведен анализ структуры указанного сигнала и сделана попытка объяснить физические процессы, обуславливающие возникновение различных зон указанного сигнала. Установлено влияние отдельных зон сигнала на точность контроля количества дефектов и их протяженность, и указаны пути снижения влияния нестабильностей сигнала на точностные характеристики измерителя дефектности. Приведена конструкция первичного преобразователя и структурная схема измерителя дефектов, в которых реализованы полученные экспериментальные результаты. Проведена оценка возможных погрешностей и показано, что по контролю количества дефектов созданный прибор имеет класс точности 1,0, а по контролю протяженности класс точности измерителя может быть оценён величиной 0,15.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Курбатова О.А., Павлюченко В.М. Монтаж и ремонт горных машин и электрооборудования: учебное пособие. – Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2004. – 286 с.
2. 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. – June 2007. – V. 14. – № 3. – P. 744–750.
3. Knich A. Mama la, Jablonski M., Uliasz P. A new generation of aluminum enameled winding wires // Wire Journal International. – 2012. – V. 45. – № 1. – P. 55–61.
4. Применение магнитодieleктрического 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. 106–117.5.
5. ГОСТ ИЕС 60851–5:2011. Провода обмоточные. Методы испытаний. Ч. 5. Электрические свойства. – М.: Стандартиформ, 2014. – 19 с.
6. ИЕС 60851–5:1996 «Windingwires-Test methods-Part 5: Electrical properties».
7. Смирнов Г.В. Надежность изоляции обмоток электротехнических изделий. – Томск: Изд-во Томского государственного университета, 1990. – 192 с.
8. Способ определения коэффициента пропитки отверждаемым полимерным составом обмоток электрических машин: пат. Рос. Федерация № 2521439; заявл. 25.10.12; опубл. 27.06.2014, Бюл. № 18. – 22 с.
9. Способ контроля и ремонта изоляции проводов: пат. Рос. Федерации № 2506601; заявл. 18.06.12; опубл. 10.02.2014, Бюл. № 4. – 16 с.
10. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. – М.: Интеллект, 2009. – 736 с.
11. Некоторые особенности коронного разряда в воздухе / С.Б. Афанасьев, Д.С. Лавренко, И.Н. Петрушенко, Ю.К. Стишков // Журнал технической физики. – 2008. – Т. 78. – Вып. 7. – С. 30–31.
12. Ховатсон А.М. Введение в теорию газового разряда. – М.: Атомиздат, 1980. – 182 с.
13. Козлов Б.А., Соловьев В.И. Численное моделирование стационарной отрицательной короны в воздухе // Журнал технической физики. – 2009. – Т. 79. – № 5. – С. 18–28.
14. Разевиг Д.В., Соколова М.В. Расчет начальных и разрядных напряжений газовых промежутков. – М.: Энергия, 1977. – 200 с.
15. Лёб Л. Основные процессы электрических разрядов в газах. – М.: Гостехиздат, 1950. – 470 с.
16. Омаров О.А., Рахадзе А.А. Физические основы плазменного пробоя газов высокого давления. Ч. 1 // Инженерная физика. – 2014. – № 12. – С. 5–26.
17. Омаров О.А., Рахадзе А.А. Физические основы плазменного пробоя газов высокого давления. Ч. 2 // Инженерная физика. – 2014. – № 12. – С. 36–56.
18. Роль термоэлектронной эмиссии в формировании и развитии искрового канала в газах / Ф.М.А. Аль-Харти, О.А. Омаров, Н.О. Омарова, П.Х. Омарова, М.Б. Хачалов // Прикладная физика. – 2015. – № 3. – С. 52–56.
19. The role of high-energy electrons during the formation of nonstationary optical emission and transmission spectra of plasma behind the edge of high-velocity ionization waves / N.A. Ashurbekov, K.O. Iminov, G.Sh. Shkhsinov, A.R. Ramasanov // High Temperature. – 2015. – V. 53. – Iss 5. – P. 627–637.
20. Ashurbekov N.A., Iminov K.O. Stratification of the plasma column in transverse nanosecond gas discharges with a hollow

- cathode // Technical Physics. – 2015. – V. 60. – № 10. – P. 1456–1463.
21. Смирнов Г.В. Измеритель дефектности изоляции обмоточных проводов // Дефектоскопия. – 1989. – № 5. – С. 93–94.
22. Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1985. – 248 с.
23. Шеннон К. Математическая теория связи // Работы по теории информации и кибернетике. – М.: Изд-во иностр. лит., 1963. – С. 243–332.
24. 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.

Поступила 19.12.2015 г.

UDC 658.382.3

PHYSICAL BASIS OF NON-DESTRUCTIVE TESTING OF WINDING INSULATION IN ELECTRIC DRIVES OF MINING AND OILFIELD EQUIPMENT

Gennadiy V. Smirnov,

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics,
40, Lenin Avenue, Tomsk, 634045, Russia. E-mail: smirnov@main.tusur.ru

Dmitriy G. Smirnov,

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics,
40, Lenin Avenue, Tomsk, 634045, Russia. E-mail: smirnov@main.tusur.ru

The relevance of the research is related to the fact that at the present time geo asset exploration, extraction, transportation in oil, mining, coal, chemical and other industries are subjected to a high level of mechanization and automation involving electrical machines. The reliability and availability of these machines operation depends on condition of turn insulation (the enamel insulation of winding wires plays its role), therefore it is a critical issue to improve the control of enamel insulation of winding wires, increasing their quality and reliability.

The aim of the research is to study the physical processes in a primary converter of defects in enamel insulation for justifying the selection of the mentioned converter design, evaluating and optimizing its metrological characteristics.

Methods. The oscillographic method is used to study the characteristics of the discharge in the air ignited between the sensor and the wire at the place of a defect. The micrometers are applied to determine the defect geometry in the enamel insulation and the distance from the sensor to the border of the defective area. The high-voltage technique is used to study the characteristics of nature and type of the discharge in the gap between the sensor and the wire strand in defective areas of enamel insulation.

Result. The authors have studied the features of the discharge in the primary defect converter when the defective section of wire approaches to it, when the defective section is located in the area of the sensor and at the exit of the section out of the sensor. The paper introduces the typical oscillograms of current and voltage from the primary defect converter when the defective section of wire insulation passes through it. The authors analyzed the signal structure and considered a possible mechanism and type of the discharge in the sensor; selected the information zones from the signal structure of the primary converter; considered the options and ways of decreasing an error when controlling the quantity and the extent of defects; developed the way of testing for defects of wire enamel insulation which allows defining the quantity and the extent of defective sections in the enamel insulation of the wire moving with any variable speed; proposed the schematic diagram of the measuring instrument of deficiency, examined the principle of its work and estimated its metrological characteristics.

Key words:

Enamel insulation, defect, defect detector, corona discharge, spark discharge, voltage, discharge current, pulse with a defect waveform, oscillogram.

REFERENCES

1. Kurbatov O.A., Pavlyuchenko V.M. *Montazh i remont gornyykh mashin i elektrooborudovaniya* [Installation and repairing of mining machinery and electrical equipment]. Vladivostok, FESTU Publ. house, 2004. 286 p.
2. 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.*, June 2007, vol. 14, no. 3, pp. 744–750.
3. Knich A., Mama la, Jablonski M., Uliasz P. A new generation of aluminum enameled winding wires. *Wire Journal International*, 2012, vol. 45, no. 1, pp. 55–61.
4. Smirnov G.V., Khasanov O.L., Smirnov D.G., Polissadov V.I., Petukovich M.S., Bikbaeva Z.G. Primenenie magnitotelluricheskogo kompozita na osnove ultradispersnogo poroshka nikel-tsinkovykh chastits dlya resursosberegayushchey tekhnologii propitki obmotok elektricheskikh mashin [Application of magneto-electric composite based on ultrafine powder of nickel-zinc particles for resource-saving technology of winding impregnation in electrical machines]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2015, vol. 326, no. 11, pp. 106–117.
5. *GOST IEC 60851-5-2011. Provoda obmotochnye. Metody ispytaniy. Ch. 5. Elektricheskie svoystva* [State Standard 60851-5-2011. Winding wires. Test methods. P. 5. Electrical properties. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 19 p.
6. *IEC 60851-5: 1996. Methods of test for Winding Wires-Part 5: Electrical properties.*
7. Smirnov G.V. *Nadezhnost izolyatsii obmotok elektrotekhnicheskikh izdeliy* [Reliability of winding insulation in electrical products]. Tomsk, Tomsk State University Press, 1990. 192 p.
8. *Sposob opredeleniya koeffitsienta propitki otverzhaemym polimernym sostavom obmotok elektricheskikh mashin* [Method of determining the coefficient of winding impregnation with curable polymer composition in electrical machines]. Patent RF, no. 2521439, 2014.
9. *Sposob kontrolya i remonta izolyatsii provodov* [Method of controlling and repairing wire insulation]. Patent RF, no. 2506601, 2014.
10. Raizer Yu.P. *Fizika gazovogo razryada* [Physics of gas discharge]. Moscow, Intellect Publ., 2009. 736 p.
11. Afanasyev S.B., Lavrenyuk D.S., Petrushenko I.N., Stishkov Yu.K. Nekotorye osobennosti koronnogo razryada v vozdukh [Some features of corona discharge in the air]. *Technical physics*, 2008, vol. 78, Iss. 7, pp. 30–31.
12. Howatson A.M. *Vvedenie v teoriyu gazovogo razryada* [Introduction into the gas discharge theory]. Moscow, Atomizdat Publ., 1980. 182 p.
13. Kozlov B.A., Solovyov V.I. Chislennoe modelirovanie stacionarnoy otritsatelnoy korony v vozdukh [Numerical simulation of stationary negative corona in the air]. *Technical physics*, 2009, vol. 79, no. 5, pp. 18–28.
14. Razevig D.V., Sokolova M.V. *Raschet nachalnykh i razryadnykh napryazheniy gazovykh promezhutkov* [Calculation of initial and discharge voltage of gas gaps]. Moscow, Energiya Publ., 1977. 200 p.

15. Loeb L. *Osnovnye protsessy elektricheskikh razryadov v gazakh* [Basic processes of electrical discharges in gases]. Moscow, Gos-tekhnizdat Publ., 1950. 470 p.
16. Omarov O.A., Rakhadze A.A. Fizicheskie osnovy plazmennogo proboya gazov vysokogo davleniya [Physical bases of plasma breakdown of high-pressure gases]. *Engineering physics*, 2014, P. 1, no. 12, pp. 5–26.
17. Omarov O.A., Rakhadze A.A. Fizicheskie osnovy plazmennogo proboya gazov vysokogo davleniya [Physical bases of plasma breakdown of high-pressure gases]. *Engineering physics*, 2014, P. 2, no. 12, pp. 36–56.
18. Al-Harti F.M.A., Omarov O.A., Omarova N.A., Omarova P.Kh., Kachalov M.B. Rol termoelektronnoy emissii v formirovani i razviti iskovogo kanala v gazakh [The role of thermionic emission in formation and development of spark channel in gases]. *Journal of applied physics*, 2015, no. 3, pp. 52–56.
19. Ashurbekov N.A., Iminov K.O., Shakhsinov G.Sh., Ramazanov A.R. The role of high-energy electrons during the formation of nonstationary optical emission and transmission spectra of plasma behind the edge of high-velocity ionization waves. *High Temperature*, 2015, vol. 53, Iss. 5, pp. 627–637.
20. Ashurbekov N.A., Iminov K.O. Stratification of the plasma column in transverse nanosecond gas discharges with a hollow cathode. *Technical Physics*, 2015, vol. 60, no. 10, pp. 1456–1463.
21. Smirnov G.V. Izmeritel defektnosti izolyatsii obmotochnykh provodov [Measuring the defects in insulation of winding wires]. *Defectoscopy*, 1989, no. 5, pp. 93–94.
22. Novitskiy P.V., Zograf I.A. *Otsenka pogreshnostey rezultatov izmereny* [Estimation of errors of measurement results]. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1985. 248 p.
23. Shannon C. *Matematicheskaya teoriya svyazi* [Mathematical theory of communication]. *Raboty po teorii informatsii i kibernetike* [Works on information theory and cybernetics]. Moscow, Inostrannaya literature Publ., 1963. pp. 243–332.
24. 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.

Received: 19 December 2015.