

Брякин И.В.¹, Бочкарев И.В.², Храмшин В.Р.³

¹ Институт автоматики и информационных технологий Национальной академии наук Кыргызской Республики

² Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова

³ Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

РАЗРАБОТКА НОВОГО МЕТОДА ДЕФЕКТОСКОПИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КАБЕЛЕЙ

Описан новый метод неразрушающего контроля параметров электрических кабелей и проводов, который может быть использован как для выявления факта наличия и места расположения дефектов в их токопроводящих жилах, так и для определения конкретных параметров этого дефекта. При реализации предложенного метода используется квантово-механическая характеристика электронов, заключающаяся в поляризации спиновых магнитных моментов свободных электронов в электропроводящих материалах под воздействием внешнего переменного электрического поля. Указанное поле предложено формировать цилиндрическим конденсатором, состоящим из двух полуцилиндрических металлических электродов, расположенных коаксиально контролируемому кабелю. Область циркуляции спиновых магнитных моментов свободных электронов, выступая гармоническим осциллятором, посредством спин-спинового взаимодействия возбуждает в электропроводящей жиле бегущую волну поляризации спиновых магнитных моментов, которая, взаимодействуя с катушкой индукционного датчика, приводит к возникновению на концах этой катушки контрольного сигнала в виде переменной ЭДС. Параметры (амплитуда и фаза) этой ЭДС содержат информацию не только о геометрических характеристиках электропроводящих жил, но и о физико-химических свойствах их материала. Дефектоскопию проводят путем сравнения контрольного сигнала с опорным сигналом. Показана процедура формирования опорного сигнала в зависимости от задач дефектоскопии. Предложенный метод обеспечивает возможность проведения контроля жил кабелей и проводов из любых электропроводящих пара- и диамагнитных материалов.

Ключевые слова: формирователь переменного электрического поля, индукционный преобразователь проходного типа, бегущая волна поляризации спиновых магнитных моментов свободных электронов, контрольный и опорный сигналы, информационно-измерительная система.

ВВЕДЕНИЕ

Качество электрических проводов и кабелей однозначно определяет работоспособность и надежность любой системы электроснабжения [1, 2]. Поэтому совершенно очевидно, что прежде чем, например, монтировать кабель, необходимо достоверно оценить его качество. Для этого необходимо осуществить комплексный контроль его эксплуатационных параметров. Такой контроль должен проводиться не только в процессе производства кабеля, но и непосредственно перед его монтажом, поскольку в процессе хранения, транспортировки и размотки с бобины он может быть поврежден. Конечно, это незначительно, но увеличит стоимость и продолжительность работ. Но использование при монтаже кабеля с дефектами в обязательном порядке приведет к принципиально большим издержкам, обусловленным перебоем электроснабжения, поиском места повреждения, удалением и ремонтом поврежденного участка кабеля и т.п. Поэтому очевидно, что дополнительный контроль кабеля перед укладкой в полной мере окупится гарантированным исключением аварийных ситуаций.

Проведенный анализ показал, что, в основном, известные системы диагностики кабельно-проводниковой продукции направлены на контроль ее изоляции [3-7]. Да, конечно, изоляция является наиболее уязвимым элементом кабеля. Но при этом его основное функциональное назначение выполняют электропроводящие элементы. Поэтому работы, посвященные разработке новых систем диагностирования технического состоя-

ния именно этих основных элементов электрического кабеля, являются весьма актуальными и имеют практическую ценность.

Известные способы неразрушающего контроля используют различные физические явления [8]. Наибольшее применение получили способы тепловой [9], оптической [10, 11], акустической [12], электромагнитной [13, 14] и вихретоковой дефектоскопии [15, 16]. Однако они не позволяют осуществлять контроль технического состояния электрических кабелей в широком диапазоне контролируемых параметров. При этом каждый из известных способов имеет ограниченную область использования и зачастую требует применения достаточно сложного оборудования и трудоемкой обработки полученных выходных сигналов. Соответственно, они могут применяться, в основном, в заводских условиях или при лабораторных исследованиях кабельно-проводниковой продукции, а в полевых условиях их использование весьма затруднительно. Поэтому при разработке нового способа диагностики электропроводящих элементов кабеля была поставлена задача расширения области его применения и повышения точности и чувствительности контроля при обеспечении простоты его аппаратной реализации.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В результате проведенных исследований было получено, что достижение поставленной задачи при разработке нового способа диагностики кабелей можно осуществить на базе применения принципиально нового, не используемого ранее в системах неразрушающего контроля, физического эффекта, заключающегося в том, что при воздействии внешнего поля происходит

изменение собственного момента количества движения электронов в электропроводящих структурах. Использование этого эффекта позволяет расширить диапазон контролируемых параметров токопроводящих элементов кабеля при их дефектоскопии, а также повысить надежность контроля. При этом практическая реализация разработанного способа диагностики получается достаточно простой. Все это в целом приводит к расширению области его применения.

На рис. 1 показана принципиальная схема реализации разработанного способа определения места дефекта электропроводящих элементов кабеля. На рис. 1 обозначено: ФПЭМ – формирователь перемещенного электрического поля; ИД – индукционный датчик; БОС – блок обработки измерительного сигнала; УСС – устройство сравнения сигналов.

ФПЭМ выполнен в виде цилиндрического конденсатора с сосредоточенной емкостью (спиновый конденсатор СК), который состоит из двух полуцилиндрических металлических электродов, расположенных коаксиально контролируемому кабелю (рис. 2, а).

Индукционный датчик ИД выполнен в виде цилиндрической многослойной катушки индуктивности с ходом витков в осевом направлении, расположенной коаксиально кабелю, и представляет собой в сущности индукционный преобразователь проходного типа (рис. 2, б). Для повышения точности работы ИД он должен быть определенным образом позиционирован относительно ФПЭМ. Для этого его смещают на такое расстояние L , при котором поля рассеяния ФПЭМ не влияют на работу ИД (см. рис. 1). Это расстояние легко определить экспериментальным путем.

Для проведения дефектоскопии на электроды спинового конденсатора СК необходимо подать переменное напряжение $\sim U$ (рис. 2, а). Тем самым в зоне контроля между электродами СК создается переменное электрическое поле $\sim \vec{E}$. Если в эту зону поместить кабель, то в его электропроводящих элементах будет возбуждаться физический процесс поляризации спинов магнитных моментов свободных электронов, причем этот процесс возникает как при перемещении кабеля, так и при его неподвижном состоянии. Этот процесс регистрируется индукционным датчиком ИД, который формирует измерительный сигнал в виде ЭДС индукции $e_{\text{изм}}$, параметры которого определяются параметрами электропроводящих элементов кабеля в зоне расположения ИД. Для подтверждения этого утверждения рассмотрим физические процессы, которые возникают в немагнитных электропроводящих элементах при воздействии на них электрического поля.

Традиционно для решения различного рода электротехнических задач в основном используется только одно свойство электрона – его заряд e .

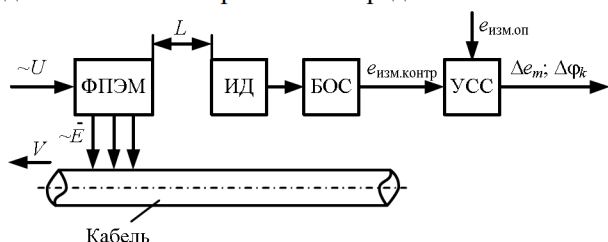


Рис. 1. Блок-схема реализации разработанного способа

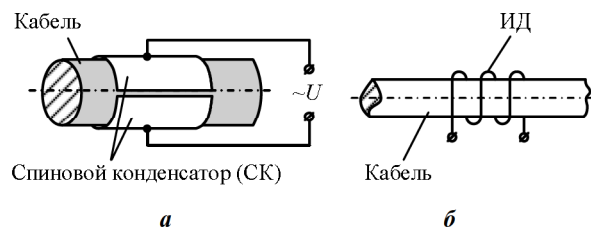


Рис. 2. Конструктивные исполнения ФПЭМ (а) и ИД (б)

В то же время электрон имеет еще одно свойство, сугубо квантово-механическую характеристику – собственный момент количества движения, или спин s . Этот собственный момент количества движения может иметь две ориентации относительно внешнего магнитного поля, направленного условно по оси \vec{Z} , такие, что две его возможные проекции по направлению этого поля будут принимать следующие значения [17]:

$$s_z = \pm h/4\pi, \quad (1)$$

где h – постоянная Планка.

Спину электрона (1) соответствует спиновый магнитный момент:

$$\vec{p}_s = g_s \vec{s}, \quad (2)$$

где $g_s = -e/m$ – гиромагнитное отношение для спинового момента; e – абсолютная величина заряда электрона; m – масса электрона.

Покажем возможность использования спиновых эффектов свободных электронов в немагнитных металлических проводниках для контроля их физических свойств.

Известно, что электрическое поле оказывает силовое воздействие на электрический заряд, находящийся в покое или в движении. Фактически напряженность электрического поля E является силой, действующей на единичный электрический заряд.

$$\vec{F} = -e \cdot \vec{E}. \quad (3)$$

Под действием этой силы электрон, имеющий заряд e и массу m , получает ускорение, равное

$$\vec{a} = e \cdot \vec{E} / m, \quad (4)$$

а за время Δt между соударениями с поверхностями атомов приобретает дополнительную скорость Δv .

Если учесть, что λ есть расстояние, пробегаемое электроном между двумя столкновениями, а $v_{\text{т.ср}}$ при этом является скоростью электрона, то величина этого промежутка времени будет равна

$$\Delta t = \lambda / v_{\text{т.ср}}.$$

Проводимость проводника σ тем больше, чем выше концентрация зарядов в единице объема металла n_e , чем больше величина заряда e и чем выше подвижность заряда μ_e , т. е.

$$\sigma = n_e e \mu_e, \quad (5)$$

где $\mu_e = \Delta v_q / E$; $\Delta v_q = a t = E e \lambda / (m v_{\text{т.ср}})$ – скорость смещения электронов в направлении вектора напряженности электрического поля E .

С учетом последнего можем записать

$$\sigma = n_e e^2 \lambda / (m v_{\text{т.ср}}), \quad (6)$$

где $n_e = dN_A/m_A$ – число электронов в единице объема проводника (плотность электронов проводимости); e – заряд электрона, равный $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл; d – плотность вещества; N_A – число Авогадро; m_A – атомная масса вещества.

Из анализа выражения (6) видно, что проводимость проводника σ является интегральным параметром, который выражает основные физические свойства материала проводника.

При отсутствии электрического поля свободные электроны в металле совершают хаотическое тепловое движение, т.е. имеют в пространстве равномерно распределенную ориентацию. Под действием электрического поля (3) хаотическое движение электронов в проводнике несколько упорядочивается, что проявляется в виде двух основных факторов: во-первых, электроны во время свободного пробега начинают ориентироваться по полю, т.е. направления траекторий их движения приобретают общую составляющую вдоль электрического поля; во-вторых, электроны приобретают некоторое ускорение в общем направлении вдоль поля, увеличивая скорость и тем самым свою кинетическую энергию. Следует отметить, что этот процесс возникает независимо от того, передвигается кабель или находится в состоянии покоя.

При рассмотрении второго свойства электрона (2), т.е. спинового магнитного момента, следует учитывать тот факт, что электрон ведет себя подобно вращающемуся вихревому кольцу, спин которого ориентирован по направлению движения электрона.

В обычных условиях спины свободных электронов с различной ориентацией компенсируют друг друга, но под воздействием электрического поля все электроны, в каком бы положении они ни находились, разворачивают свои оси так, что образуется некоторая общая составляющая проекций их спинов на направление вектора напряженности электрического поля $\vec{E} = (0, E_y, 0)$:

$$\vec{P}_{sy} = -\frac{e}{m} N \sum_{n=1}^N (\vec{s}_n \vec{k}_y), \quad (7)$$

где $N = n_e V_{\text{раб}} \chi_s$ – эффективное число свободных электронов в рабочем пространстве $V_{\text{раб}}$ спинового конденсатора, спины которых ориентированы в направлении единичного вектора \vec{k}_y ; \vec{k}_y – единичный вектор, совпадающий с направлением вектора напряженности электрического поля; $\chi_s = |\vec{E}_y|/|\vec{E}_{y\text{эф}}|$ – коэффициент спиновой поляризации для конкретного типа материала проводника; $|\vec{E}_y|$ – значение напряженности воздействующего электрического поля; $|\vec{E}_{y\text{эф}}|$ – значение напряженности электрического поля, при котором происходит максимальная спиновая поляризация всех свободных электронов в единице объема материала проводника в направлении единичного вектора \vec{k}_y .

При подаче на электроды спинового конденсатора электрического напряжения вида $U = U_m \cos \omega t$ (см. рис. 2, а) создается источник возбуждающего монохроматического переменного электрического поля:

$$\vec{E} = E_m \cos(\omega t + \varphi_E). \quad (8)$$

Под воздействием переменного электрического поля (8) определенной циклической частоты $\omega = \omega_s$ (резонансная частота спинового взаимодействия) в объеме электропроводящего элемента кабеля, заключенного в рабочем пространстве $V_{\text{раб}}$ спинового конденсатора, возбуждаются колебательные смещения свободных электронов в направлении вектора напряженности электрического поля с определенной колебательной скоростью:

$$\begin{aligned} \Delta \vec{v}_q &= -\int \frac{e}{m} E_m \cos(\omega_s t + \varphi_E) dt = \\ &= \frac{e}{\omega_s m} E_m \sin(\omega_s t + \varphi_E) = \Delta v_{qm} \sin(\omega_s t + \varphi_E), \end{aligned} \quad (9)$$

где $\Delta v_{qm} = (e/\omega_s m) E_m$ – модуль колебательной скорости электрона.

В этом случае спиновые магнитные моменты всех свободных электронов внутренней структуры электропроводящего элемента в рабочем пространстве $V_{\text{раб}}$ спинового конденсатора соответствующим образом синхронизируются частотой этого электрического поля, т.е. получают соответствующую периодически изменяющуюся одинаковую направленность. Фактически колебательная скорость электронов (9) приводит к периодической переориентации спинов электронов s_n ($n = 1..N$), которая в итоге приводит к возникновению в рабочем пространстве $V_{\text{раб}}$ спинового конденсатора соответствующей упорядоченной циркуляции суммарного спинового магнитного момента свободных электронов проводника. Существование подобной области спиновой циркуляции приводит к дальнейшей последовательно индуцированной спиновой поляризации свободных электронов в остальной структуре материала проводника.

Следует отметить, что в основе данного физическо-го процесса лежит спин-спиновое взаимодействие, т.е. прямое взаимодействие спиновых магнитных моментов свободных электронов, пропорциональное произведению спиновых магнитных моментов и обратно пропорциональное кубу расстояния между ними [18]:

$$F_{sij} = \frac{\vec{P}_{si} \vec{P}_{sj}}{r^3} \vec{r}, \quad (10)$$

где $r \equiv |\vec{r}|$; $\vec{r} = \vec{r}_i - \vec{r}_j$.

Таким образом, под воздействием переменного электрического поля в рабочей зоне спинового конденсатора в структуре проводника кабеля формируется особая область спиновой циркуляции, функционирующая в режиме гармонического осциллятора с вынужденными колебаниями.

Для такого простейшего гармонического осциллятора можно записать уравнение вида

$$\frac{d^2 \vec{p}_s}{dt^2} - \omega_s^2 \cdot \vec{p}_s = Q(\vec{y}, t), \quad (11)$$

где $Q(\vec{y}, t) = (-e E_m / m) \sin(\omega_s t + \varphi_E)$ – некоторая функция, характеризующая распределенные внешние воздействия.

Решая это неоднородное дифференциальное уравнение второго порядка с учетом резонансного режима работы гармонического осциллятора, получим следующее выражение:

$$\begin{aligned}\bar{p}_s &= p_{sm} \cos(\omega_s t + \varphi_s) = \\ &= -\frac{e}{m} \bar{s} \cos(\omega_s t + \varphi_s).\end{aligned}\quad (12)$$

В соответствии с уравнениями (7) и (12), для упорядоченной циркуляции суммарного спинового магнитного момента свободных электронов проводника в направлении оси \bar{x} составим следующее уравнение:

$$\begin{aligned}\bar{p}_{s\Sigma} &= \left[\frac{e}{m} N \sum_{n=1}^N (\bar{s}_n \bar{k}_x) \right] \cos(\omega_s t + \varphi_s) = \\ &= p_{s\Sigma m} \cos(\omega_s t + \varphi_s),\end{aligned}\quad (13)$$

где $p_{s\Sigma m} = [(e/m)N \sum_{n=1}^N (\bar{s}_n \bar{k}_x)]$ – амплитудное значение суммарного спинового магнитного момента свободных электронов в рабочем пространстве $V_{\text{раб}}$ спинового конденсатора.

Посредством данного гармонического осциллятора (13) возбуждается волновой процесс спиновой индукции с фазовой скоростью $\bar{v} = \lambda f$ вдоль оси \bar{x} по всей длине электропроводящих элементов кабеля. В этом случае процесс возбуждения и распространения плоской гармонической волны вдоль координатной оси \bar{x} описывается уравнением вида:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0. \quad (14)$$

С учетом выражения (14) в линейном приближении для распространения волнового процесса спиновой индукции можем записать:

$$\frac{\partial^2 \bar{B}_s}{\partial x^2} - k^2 \frac{\partial^2 \bar{B}_s}{\partial t^2} = 0. \quad (15)$$

Решением волнового уравнения (15) является следующее аналитическое выражение:

$$\bar{B}_s = B_{sm} \cos(\omega_s t - kx + \varphi_B), \quad (16)$$

где $B_{sm} = p_{s\Sigma m} \eta_3 [1 - (\omega_s - \omega_0)/\omega_0]$ – амплитудное значение вектора спиновой индукции; $\eta_3 = f(\sigma, \omega)$ – коэффициент эволюции волнового процесса спиновой индукции, отражающий эффективность преобразования энергии гармонического осциллятора в волновой процесс спин-спинового взаимодействия; $k = i\omega \sqrt{\epsilon_a \mu_a} = [(1+i)/\sqrt{2}] \sqrt{\omega \mu_a \sigma}$ – коэффициент распространения волны при отсутствии магнитных потерь, т.е. $\mu_a = \mu_a - \text{комплексная магнитная проницаемость материала проводника}$; $\epsilon_a = \epsilon_a - i\sigma/\omega \cong -i\sigma/\omega$ – комплексная диэлектрическая проницаемость материала проводника, т.е. при $\sigma \gg \omega \epsilon_a$; ω_0 – граничная нижняя циклическая частота возбуждающего электрического поля, при которой $\eta_3 = 0$; $\omega_s \geq \omega_0$.

В соответствии с (16) для потока спиновой индукции справедливо выражение:

$$\bar{\Phi}_s = \bar{B}_s S = S \cdot B_{sm} \cdot \cos(\omega_s t - kx + \varphi_B), \quad (17)$$

где S – среднее сечение проводника.

В основе рассматриваемого физического явления лежит тот факт, что электроны, взаимодействуя своими спиновыми магнитными моментами друг с другом по всей длине электропроводящего элемента кабеля, образуют своего рода пространственно распределенный вдоль этого элемента отрицательный заряд с волнообразно изменяющейся во времени спиновой поляризацией, образующей своего рода поток спиновой индукции (рис. 3).

Поток спиновой индукции (17), воздействуя на витки обмотки индукционного датчика, индуцирует в этой обмотке соответствующую ЭДС:

$$\begin{aligned}e_{\text{изм}} &= -w_k \frac{d\Phi_s}{dt} = \\ &= w_k \cdot \omega_s \cdot S \cdot B_{sm} \cdot \sin(\omega_s t - kx + \varphi_B).\end{aligned}\quad (18)$$

Обобщая вышесказанное и в соответствии с (18), можно констатировать следующее: 1 – переменное электрическое поле создает область спиновой циркуляции в рабочей зоне спинового конденсатора; 2 – область циркуляции спиновых магнитных моментов свободных электронов, выступая гармоническим осциллятором, посредством спин-спинового взаимодействия возбуждает в примыкающих к ней структурах электропроводящего элемента кабеля бегущую волну поляризации спиновых магнитных моментов свободных электронов (поток спиновой индукции) и управляет ее дальнейшей эволюцией в структуре этого элемента по всей его длине; 3 – бегущая волна поляризации спиновых магнитных моментов свободных электронов (поток спиновой индукции), взаимодействуя с катушкой индукционного датчика, приводит к возникновению соответствующей выходной переменной ЭДС на концах этой катушки; 4 – параметры (амплитуда и фаза) регистрируемой выходной ЭДС $e_{\text{изм}}$ обмотки индукционного датчика фактически несут информацию не только о геометрических характеристиках электропроводящих элементов кабеля, но и о физико-химических свойствах их материала.

Для создания необходимых условий для возникновения устойчивого процесса поляризации спиновых магнитных моментов свободных электронов переменное электрическое поле создают на резонансной частоте поляризации спиновых магнитных моментов свободных электронов структур электропроводящих элементов кабелей. Указанная частота переменного электрического поля определяется экспериментальным путем.

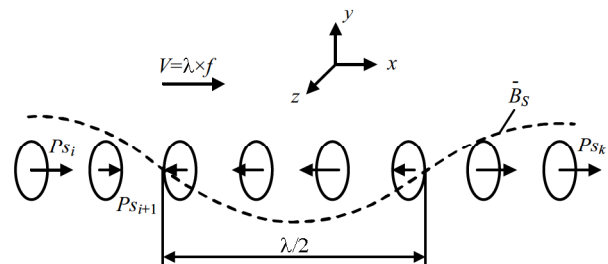


Рис. 3. Пространственное распределение потока спиновой индукции

ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

Предварительно необходимо сформировать опорный сигнал в виде ЭДС индукции $e_{\text{изм.оп}}$. Если проводится процесс отбраковки неисправного кабеля, при котором необходимо зафиксировать только сам факт наличия и вид дефекта электропроводящих элементов кабеля без определения конкретных параметров этого дефекта, опорный сигнал получают путем размещения между электродами спинового конденсатора отрезка эталонного кабеля без дефектов, аналогичного кабелю, который в дальнейшем будет контролироваться. Посредством воздействия на этот эталонный кабель переменным электрическим полем индукционным датчиком формируют измерительный сигнал в виде ЭДС $e_{\text{изм.контр}}$, пропорциональный его техническим параметрам. Затем этот сигнал обрабатывается в блоке БОС, где он фильтруется, усиливается, определяются его амплитуда и фаза, которые в дальнейшем оцифровываются и соответствующим образом вводятся в персональный компьютер (ПК) специализированным аппаратным интерфейсом, установленным на материнскую плату ПК. В рассматриваемом случае ПК фактически выполняет функции УСС.

После этого между электродами спинового конденсатора размещают контролируемый электрический кабель, перемещают его относительно спинового конденсатора и индукционного датчика, постоянно формируя при этом текущий контрольный сигнал в виде ЭДС индукции $e_{\text{изм.контр}}$. Параметры контрольного сигнала постоянно сравниваются в УСС с параметрами опорного сигнала $e_{\text{изм.оп}}$ и по величине отклонения сравниваемых параметров Δe_m и $\Delta \varphi_m$ оценивают качество электропроводящих элементов кабеля.

При наличии дефекта электропроводящих элементов на контролируемом участке кабеля в месте расположения индукционного датчика, например обрыва или существенного уменьшения живого сечения этих элементов, на этом участке происходит срыв процесса спиновой магнитной поляризации свободных электронов, что в итоге приводит к исчезновению потока спиновой индукции, а соответственно, и к значительному уменьшению ЭДС $e_{\text{изм.контр}}$. В свою очередь, дефекты, вызывающие аномальные изменения в структуре электропроводящих элементов контролируемого кабеля и связанные, прежде всего, с изменением состава материала этого элемента, проявятся в виде значительных девиаций фазы регистрируемой ЭДС $e_{\text{изм.контр}}$.

Поэтому для обнаружения дефектов типа обрыва или потери сечения в качестве результата сравнения используют разность амплитуд контрольного и опорного сигналов, а для обнаружения дефектов типа нарушения сплошности или отклонения от заданного химического состава в качестве результата сравнения используют разность фаз контрольного и опорного сигналов.

При отключении спинового конденсатора от возбуждающего переменного напряжения свободные электроны в электропроводящих элементах кабеля возвращаются к своему первоначальному хаотическому состоянию, при котором их спиновые магнитные моменты утрачивают свою периодически изменяющуюся одинаковую направленность, т.е. электроны теряют индуцированную поляризацию своих спиновых

магнитных моментов, в результате чего исчезает поток спиновой индукции.

Описанные процедуры контроля и их последовательность целесообразно проводить в том случае, когда требуется провести процесс отбраковки неисправного кабеля, например в полевых условиях непосредственно в процессе монтажа кабеля при его размотке с бобины.

В случае необходимости ранжирования выявленных дефектов с определением конкретных параметров дефекта необходимо предварительно сформировать базу данных параметров опорных сигналов в виде значений амплитуд e_{m0i} и фаз φ_{0i} ЭДС индукции $e_{\text{изм.оп}}$, полученную экспериментальным путем по результатам измерения в образцах кабеля с искусственно созданными фиксированными дефектами. В этом случае конкретные параметры дефекта фиксируются при совпадении текущих значений параметров контрольных сигналов $e_{\text{изм.контр}}$ и параметров опорных сигналов $e_{\text{изм.оп}}$, т.е. при выполнении условий $\Delta e_m = 0$ и/или $\Delta \varphi_m = 0$. Такой контроль целесообразно проводить, например, непосредственно в процессе производства, что позволит непосредственно в режиме реального времени отслеживать дефекты физических параметров кабельных изделий и вносить необходимые корректировки в технологический процесс их изготовления.

Для подтверждения работоспособности и эффективности предложенного способа дефектоскопии были проведены экспериментальные исследования с использованием соответствующей информационно-измерительной системы (ИИС), реализующей предложенный принцип контроля и состоящей из следующих функциональных элементов (см. рис. 1): ИД; БОС и УСС. В свою очередь, БОС содержит активный фильтр, амплитудный и фазовый детекторы, собранные на прецизионных операционных усилителях и образующие два соответствующих измерительных канала. С выходов измерительных каналов БОС снимаются сигналы, величины которых пропорциональны соответственно амплитуде и фазе ЭДС индукции $e_{\text{изм.контр}}$. Функции блока УСС выполняет персональный компьютер (ПК), на материнской плате которого установлен аппаратный интерфейс PCI-1710HG, осуществляющий как оцифровку сигналов с БОС, так и последующий ввод полученной цифровой информации в ПК. Связь между БОС и ПК осуществляется посредством монтажного терминала PCLD-8710. Значения параметров опорных сигналов $e_{\text{изм.оп}}$ также вводятся в ПК через монтажный терминал PCLD-8710 и аппаратный интерфейс PCI-1710HG. В качестве примера в таблице приводятся некоторые результаты отдельных экспериментальных исследований.

Результаты экспериментальных исследований

Материал проводника	Номинальное сечение S , мм ²	Параметры регистрируемого электрического сигнала		Напряжение возбуждения спинового конденсатора, В
		Амплитуда, В	Фаза, град	
Медь	обрыв	0,001	0	2
	0,75	0,212	-19	
	1,0	0,241	-20	
	1,2	0,3	-21	
Алюминий	обрыв	0,001	0	
	0,75	0,123	8	
	1,0	0,132	9	
	1,2	0,15	10	

Таким образом, экспериментальные исследования устройства, реализующего описанный способ, показали высокую эффективность и достоверность определения места обрыва электропроводящих элементов кабеля и контроля физических параметров дефекта, что позволяет проводить всестороннюю оценку способности кабеля выполнять свои функции.

Выводы

Использование спин-поляризационных явлений, обусловленных наличием у электронов поляризуемого спина и возникающих при воздействии переменного электрического поля на свободные электроны электропроводящих элементов кабеля, позволяют проводить всесторонние исследования как самой структуры электропроводящих элементов кабеля, так и их физических свойств. К основным преимуществам этого способа следует отнести следующие качества: 1 – возможность проведения контроля электропроводящих элементов кабеля из любых электропроводящих пара- и диамагнитных материалов; 2 – точность и надежность контроля не зависит от величины и равномерности скорости перемещения кабеля, а также от вибрации и его поперечных колебаний относительно источника физического поля и индукционного датчика; 3 – позволяет осуществлять контроль при неподвижном кабеле; 4 – обеспечивает неразрушающую диагностику кабеля без ухудшения его эксплуатационных характеристик; 5 – является простым в использовании при контроле параметров как в процессе изготовления кабеля, так и при отбраковке кабеля при его размотке с бобины в процессе укладки.

В заключение следует отметить, что разработанный способ может быть использован не только для диагностики электрических кабелей и проводов, но и для других длинномерных изделий из металлических немагнитных материалов, выполненных в виде стержней, труб и т.п. По сравнению с известными методами контроля, данный способ обеспечивает повышение достоверности контроля в целом и расширение области его применения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуревич Ю.Е., Кабиков К.В. Особенности электроснабжения, ориентированного на бесперебойную работу промышленного потребителя. М.: Торус Пресс, 2015. 408 с.
2. Хорольский В.Я., Таранов М.А. Надежность электроснабжения. М.: Форум, Инфра-М, 2013. 128 с.

3. Редько В.В. Электроискровой контроль качества изоляции кабельных изделий. Томск: Изд-во ТПУ, 2013. 176 с.
4. Холодный С.Д., Серебрянников С.В., Боев М.А. Методы испытаний и диагностики в электроизоляционной и кабельной технике. М.: Изд-во МЭИ, 2009. 232 с.
5. Starikova N.S., Redko V.V., Vavilova G.V. Comparison of Cable Insulation Control in Weak and Strong Electric Fields / N.S. Starikova// Applied Mechanics and Materials. 2015. № 756. С. 486-490.
6. Blohm W. Advanced on-line measuring and analysis techniques for an economical cable production // Proceedings Intl. IWMA Conf. Economical Processing of Rod to Wire & Cable. 1999, с. 67-75.
7. Benjamin T.L. Power Cable Diagnostics: Field Application and Case Studi // Neta World, USA. 2004. P. 1-6.
8. ГОСТ Р 56542-2015. Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов. М.: Стандартинформ, 2016. 12 с.
9. Будадин О.Н., Потапов А.И., Колганов В.И. Тепловой неразрушающий контроль изделий. М.: Наука. 2002. 472 с.
10. Фёдоров Е.М., Гольдштейн А.Е., Редько В.В. Методы и приборы оптического контроля диаметра и овальности электрических кабелей в процессе их производства // Ползуновский вестник. 2010. № 2. С. 141-148.
11. Приборы технологического контроля для кабельного производства. Каталог продукции «ЭРМИС-2003». Томск, 2003. 16 с.
12. Неразрушающий контроль. Кн. 2. Акустические методы контроля / под ред. В.В. Сухорукова. М.: Высшая шк., 1992. 283 с.
13. Герасимов В.Г., Покровский А.Д., Сухоруков В.В. Неразрушающий контроль. Кн. 3. Электромагнитный контроль. М.: Высш. шк., 1992. 320 с.
14. Бочкарев И.В., Брякин И.В., Гунина М.Г. Система оперативного контроля технического состояния электрических кабелей // Проблемы автоматизации и управления: Научно-техн. журнал / НАН КР. Бишкек: Илим, 2018. №1 (34). С. 55-63.
15. Яковлев С.Г. Методы и аппаратура магнитного и вихревого контроля. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2003. 88 с.
16. Шубочкин А.Е. Развитие и современное состояние вихретокового метода неразрушающего контроля. М.: Издательский дом «Спектр», 2014. 288 с.
17. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. М.: Наука, 1977. 940 с.
18. Агранович В.М., Галанин М.Д. Перенос энергии электронного возбуждения в конденсированных средах. М.: Наука, 1978. 383 с.
19. Смоленский Г.А., Леманов В.В. Ферриты и их техническое применение. М.: Наука, 1975. 219 с.

Поступила в редакцию 28 сентября 2018 г.

INFORMATION IN ENGLISH

DEVELOPMENT OF NEW METHOD OF NON-DESTRUCTIVE TESTING OF ELECTRICAL CABLES

Ivan V. Bryakin

D.Sc. (Engineering), Senior Researcher, Chief of laboratory of Information and Measuring Systems, Institute of Automation and Information Technology, National Academy of Sciences of Kyrgyz Republic, Bishkek, Kyrgyzstan. E-mail: bivas2006@yandex.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7463-8072>.

Igor V. Bochkarev

D.Sc. (Engineering), Professor, Department of Electrical Engineering, Electric Power Faculty, Kyrgyz State Technical University after I. Razzakov, Bishkek, Kyrgyzstan. E-mail: elmech@mail.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9873-9203>.

Vadim R. Khramshin

D.Sc. (Engineering), Professor, Department of Electric Power Supply of Industrial Enterprises, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: hvrnmg@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0972-2803>.

The paper describes a new method of non-destructive testing of parameters of electrical cables and wires, which can be used to find and localize defects in electric conductors as well as to determine certain parameters of the discovered defect. In order to implement the suggested method, the quantum-mechanical characteristic of electrons is used, which consists in polarization of spin magnetic moments of mobile electrons in current-conducting materials under the influence of an external alternating electric field. The specified field can be formed by a cylindrical capacitor consisting of two semicylindrical metal electrodes located coaxially to the controlled cable. The region of circulation of spin magnetic moments acting as a harmonic oscillator by means of spin-spin interaction excites a progressive polarization wave of spin magnetic moments in the conductive wire and this wave interacting with the coil of the induction transmitter generates a control signal in the form of alternating electromotive force on the coil ends. Parameters of this electromotive force (amplitude and phase) contain information both about the dimensional characteristics of the current conducting wires and about the physical and chemical properties of the material they are made from. The non-destructive testing is carried out by means of comparison of the control signal with the reference one. The process of the reference signal formation depending on the purposes of the testing is shown in the paper. The suggested method can be used to control the cables and wires made from any electrically-conductive paramagnetic and diamagnetic materials.

Keywords: alternating electric field source, through-type induction transducer, travelling polarization wave of spin magnetic moments of mobile electrons, control and reference signals, data measuring system.

REFERENCES

- Gurevich Yu.E., Kabikov K.V. *Osobennosti elektrosnabzheniya, orientirovannogo na bespereboynuyu rabotu promyshlennogo potrebitelya* [Characteristic properties of electric power supply of the industrial customer operating continuously]. Moscow: Torus Press, 2015. 408 p. (In Russian)
- Khorolskiy V.Ya., Taranov M.A. *Nadyezhnost elektrosnabzheniya* [Reliability of electric power supply]. Moscow: Forum, Infra-M, 2013. 128 p. (In Russian)
- Redko V.V. *Elektroiskrovoy control kachestva izolyatsii kabelnykh izdeliy* [Electrospark quality control of cable product insulation]. Tomsk: Publishing center of TPU, 2013. 176 p. (In Russian)
- Kholodnyi S.D., Serebryannikov S.V., Boev M.A. *Metody ispytaniy i diagnostiki v elektroizolyatsionnoy i kabelnoy tekhnike* [Testing and diagnostics methods in electroinsulating and cable engineering]. Moscow: Publishing center of MEI, 2009. 232 p. (In Russian)
- Starikova N.S., Redko V.V., Vavilova G.V. Comparison of Cable Insulation Control in Weak and Strong Electric Fields. *Applied Mechanics and Materials*. 2015. no. 756, pp. 486-490
- Blohm W. Advanced on-line measuring and analysis techniques for an economical cable production. *Proceedings Intl. IWMA Conf. Economical Processing of Rod to Wire & Cable*. 1999, pp. 67-75.
- Benjamin T.L. *Power Cable Diagnostics: Field Application and Case Studies* // Neta World, USA. 2004, pp. 1-6.
- GOST R 56542-2015. Non-destructive testing. Classification of methods. M.: Standartinform, 2016. 12 p. (In Russian)
- Budadin O.N., Potapov A.I., Kolganov V.I. *Teplovoy nerazrushayushchiy control izdeliy* [Thermal non-destructive testing of final products]. Moscow: Nauka, 2002. 472 p. (In Russian)
- Fedorov E.M., Goldshteyn A.E., Redko V.V. Methods and instruments of optical inspection of the diameter and the out-of-roundness of electric cables during manufacturing. *Polzunovskiy vestnik* [Polzunov Bulletin], 2010, no. 2, pp. 141-148. (In Russian)
- Pribory tekhnologicheskogo kontrolya dlya kabelnogo proizvodstva* [Instruments process control for cable manufacturing]. Catalogue of products of «ERMIS-2003». Tomsk, 2003. 16 p. (In Russian)
- Nerazrushayushchiy kontrol* [Non-destructive testing]. Vol. 2. Acoustic control methods. Under the editorship of V.V. Sukhorukov. Moscow: High school, 1992. 283 p. (In Russian)
- Gerasimov V.G., Pokrovskiy A.D., Sukhorukov V.V. *Nerazrushayushchiy kontrol* [Non-destructive testing]. Vol. 3. Electromagnetic testing. M.: High school, 1992. 320 p. (In Russian)
- Bochkarev I.V., Bryakin I.V., Gunina M.G. System of operation monitoring of the technical state of electric cables. *Problemy avtomatiki i upravleniya* [Problems of automation and control]: Scientific and technical journal. NAN KR. Bishkek: Ilim, 2018, no. 1 (34), pp. 55-63. (In Russian)
- Yakovlev S.G. *Metody i apparatura magnitnogo i vikhrevogo kontrolya* [Methods and instruments of magnetic and vortex testing]. Saint-Petersburg: Publishing center of SPBGUTU «LETI», 2003. 88 p. (In Russian)
- Shubochkin A.E. *Razvitiye i sovremennoe sostoyaniye vikhretokovogo metoda nerazrushayushchego kontrolya* [Development and the current state of the eddy current method of non-destructive testing]. M.: Publishing house «Spectrum», 2014. 288 p. (In Russian)
- Yavorskiy B.M., Detlaf A.A. *Spravochnik po fizike* [Physics reference book]. Moscow: Science, 1977. 940 p. (In Russian)
- Agranovich V.M., Galanin M.D. *Perenos energii elektronogo vzbuzhdeniya v kondensirovannykh sredakh* [Transfer of electron excitation energy in condensed media]. Moscow: Science, 1978. 383 p. (In Russian)
- Smolenskiy G.A., Lemanov V.V. *Ferrity i ikh tekhnicheskoe primeneniye* [Ferrites and their engineering applications]. Moscow: Nauka, 1975. 219 p. (In Russian)

Брякин И.В., Бочкарев И.В., Храмыш В.Р. Разработка нового метода дефектоскопии электрических кабелей // *Электротехнические системы и комплексы*. 2018. № 4(41). С. 4-10. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-4\(41\)-4-10](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-4(41)-4-10)

Bryakin I.V., Bochkarev I.V., Khramshin V.R. Development of New Method of Non-destructive Testing of Electrical Cables. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2018, no. 4(41), pp. 4-10. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-4\(41\)-4-10](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-4(41)-4-10)