

## ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА, АВТОМАТИКА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 620.317.179.14

[https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-2\(35\)-49-54](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-2(35)-49-54)Брякин И.В.<sup>1</sup>, Бочкарев И.В.<sup>2</sup><sup>1</sup>Институт автоматики и информационных технологий Национальной Академии Наук Кыргызской Республики<sup>2</sup>Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова

## ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ДАТЧИК ДЛЯ СИСТЕМ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ СТАЛЬНЫХ КАНАТОВ

Приводятся результаты аналитического обзора известных методов и технических средств неразрушающего контроля (НК) стальных проволочных канатов. Анализ эксплуатационных возможностей и особенностей функционирования этих технических средств НК показал необходимость разработки новых подходов в области создания измерительных датчиков для систем технического контроля и диагностики состояния стальных канатов. Обоснована возможность создания на базе феррозонда нового типа «гибридного» метода НК с расширенными функциональными возможностями. В отличие от традиционного феррозондового метода, использующего модулирующее воздействия переменного магнитного поля, источником которого является многовитковая катушка (магнитный диполь), разработанный «гибридный» метод основан на применении в качестве модулятора вибраторной антенны (электрический диполь), которая инициирует в ферромагнитной среде магнитоэлектрические процессы. В предложенном методе НК и его схемотехнической реализации используется одновременно несколько физических эффектов: влияние дефекта на характер пространственного распределения магнитного потока в среде; влияние дефекта на величину трансформаторной ЭДС; влияние дефекта на величину магнитомодуляционной ЭДС. Фактически предлагаемый метод НК объединяет в себе потенциальные возможности трех магнитных методов НК: постоянного магнитного поля, переменного магнитного поля и феррозондового метода. Применение предложенной алгоритмической обработки результатов измерения выходного сигнала индукционного датчика позволяет идентифицировать тип дефекта и определять его геометрические и физико-химические характеристики.

**Ключевые слова:** стальной канат, неразрушающий контроль, дефект, дефектоскоп, измерительный датчик, магниточувствительный элемент, магнитное поле, феррозонд, модулятор, вибрационная антенна.

## ВВЕДЕНИЕ

Стальные канаты (СК) широко используются как основной грузонесущий элемент или элемент растяжек и крепления во многих отраслях производства на различных технических объектах, таких как шахты, канатные дороги, подвесные мосты, строительные конструкции, различные подъемно-транспортные машины и грузоподъемные механизмы и т.п. Кроме того, СК относятся к неремонтируемым элементам машин и сооружений, которые в процессе эксплуатации испытывают большие механические нагрузки, часто в условиях воздействия агрессивных сред, что неизбежно приводит их к различным видам износа. Снижение запаса их прочности из-за износа или повреждения повышает опасность аварий и часто требует замены СК. Поэтому надежность и безопасность эксплуатации перечисленных выше механизмов и сооружений, в первую очередь, определяется техническим состоянием используемых канатов [1–3].

Следует отметить, что существующие нормы безопасности для СК нередко устанавливаются на основе допустимого срока их эксплуатации, а не по фактическому состоянию. Подобная ситуация может приводить либо к значительным экономическим потерям в случае преждевременной замены дорогого и вполне годного к дальнейшей эксплуатации СК или же в пределах допустимого срока может продолжаться использование СК, фактическое состояние которого находится хуже установленного предела, что представляет собой особую опасность. Исходя из этого, очевидно, что именно оценка фактического состояния позволит обеспечить необходимый уровень безопасности при минимизации экономических затрат.

Известно, что фактическое состояние СК в экс-

плуатации оценивают как разрушающими, так и неразрушающими методами [4]. Первые используют для оценки прочности образцов при различных видах нагружения, а вторые – для определения потери прочности из-за абразивного износа, коррозии и повреждений.

## АНАЛИЗ МАГНИТНЫХ МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ СТАЛЬНЫХ КАНАТОВ

Основу оперативной технической диагностики, определяющей фактическое состояние СК, составляют методы неразрушающего контроля (НК) [5, 6]. Связь между НК дефектов (дефектоскопией) и надежностью конструктивных элементов обусловлена тем, что в подавляющем большинстве случаев разрушение этих элементов начинается с зарождения и развития в нем трещины, а также с развития уже имеющихся технологических несплошностей. Широкое применение методов НК, не требующих вырезки образцов или разрушения готовых изделий, позволяет избежать больших потерь времени и материальных затрат, обеспечить частичную или полную автоматизацию операций контроля при одновременном значительном повышении качества и надежности изделий. Именно НК позволяет своевременно диагностировать стадию начала разрушения и предотвратить его развитие и катастрофические последствия.

Из всего комплекса известных методов НК для задач диагностики состояния СК можно выделить визуально-измерительные методы НК, которые позволяют оценить износ, коррозию и повреждения проволок на поверхности каната, так называемые локальные дефекты (ЛД), и магнитный метод НК, основанный на анализе взаимодействия магнитного поля и объекта контроля (ОК) и ориентированный на решение не только этих задач, но и диагностику состояния проволок внутри СК [7, 8]. Отметим, что потеря сечения (ПС) измеряется только приборами маг-

нитного НК (магнитными дефектоскопами), так как требует оценки не только поверхностного износа и/или коррозии каната, но и внутреннего, не доступного визуальным средствам контроля.

Поэтому именно посредством магнитных дефектоскопов измеряют такой важный интегральный параметр потери прочности каната, как потерю его металлического сечения.

Наиболее широкое применение в магнитной дефектоскопии СК нашли методы постоянного магнитного поля и переменного магнитного поля. Первый из названных методов основан на том, что при намагничивании объекта контроля (ОК) до технического насыщения электромагнитами постоянного тока или постоянными магнитами вблизи поверхности ОК, имеющей несплошность (дефект), в области дефекта происходит резкое пространственное изменение напряженности магнитного поля, что в свою очередь приводит к возникновению поля рассеяния (рис. 1).

В данном случае первичным информативным параметром является конкретный параметр магнитного поля рассеяния (амплитуда поля, его конфигурация в пространстве, время его распространения и т. д.), изменение которого используют для характеристики ОК. Поэтому изменение градиента напряженности магнитного поля рассеяния используется как первичный информативный параметр для выявления дефектов.

Для индирования полей рассеяния на дефектах (получения первичной информации) и измерения магнитных характеристик материалов используют измерительные датчики (ИД) типа катушки индуктивности (индукционный метод), феррозондов (феррозондовый метод), преобразователей Холла и магниторезисторов. Данные типы ИД служат для преобразования параметров магнитного поля в электрический сигнал или в сигнал промежуточного вида.

Особенностью ИД в виде катушки индуктивности является необходимость их пространственного перемещения относительно намагниченного участка детали. В зависимости от расположения вектора напряженности магнитного поля катушка индуктивности может иметь расположение вдоль оси детали или перпендикулярно ей.

Контроль СК с помощью датчиков Холла или магниторезисторов осуществляется путем расположения их на окружности, соосной к СК.

О наличии дефекта судят по увеличению интенсивности поля рассеяния, а следовательно, по изменению соответственно электрического напряжения на датчиках Холла или меняющемуся электросопротивлению магниторезисторов.

Наиболее чувствительным из перечисленных ИД является феррозонд, имеющий два сердечника, на каждом из которых намотаны по две катушки (рис. 2). Одна из катушек  $w_1$  каждого сердечника (возбуждающая) питается от переменного тока, другая  $w_2$  является измерительной.

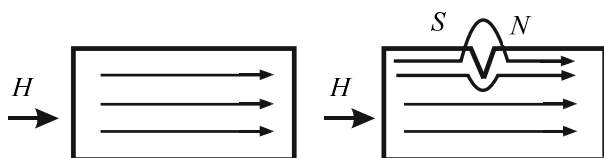


Рис. 1. Магнитное поле в ферромагнитном материале при отсутствии (а) и наличии (б) трещины: N и S – магнитные полюса вблизи трещины

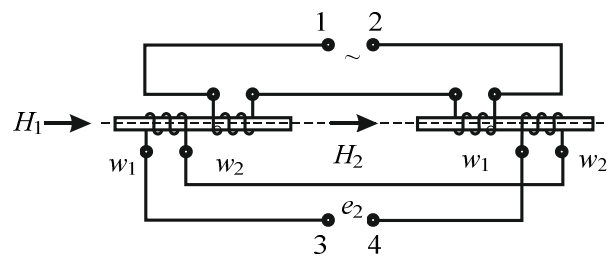


Рис. 2. Двухэлементный феррозонд с двумя катушками сема

Поскольку возбуждающие катушки включены навстречу друг другу, то при отсутствии внешнего магнитного поля ЭДС индукции катушек компенсируют друг друга, и на выходе формируется нулевой сигнал. При действии внешнего магнитного поля рассеяния равновесие нарушается, и по изменению выходного сигнала судят о дефекте.

Второй из рассматриваемых методов магнитного НК, т.е. метод переменного магнитного поля [5], основан на зависимости индуктивности или взаимной индуктивности обмоток катушек на магнитопроводе от геометрических размеров и магнитного состояния элементов их магнитной цепи (рис. 3). В данном случае первичная информация регистрируется посредством трансформаторного датчика, элементом магнитной цепи которого является СК.

Значительная часть рассмотренных магнитных методов НК требует проведения предварительного намагничивания или подмагничивания зоны контроля металла до технического насыщения с использованием специальных намагничивающих систем. В этом случае трудность намагничивания повышается с увеличением габаритов ОК, а также с увеличением количества труднодоступных и трудноконтролируемых участков ОК.

Кроме того, на результаты измерений большое влияние оказывает зазор между поверхностью контроля и ИД, что существенно снижает возможности магнитных методов неразрушающего контроля во время оперативной диагностики состояния СК.

Результаты проведенного анализа функциональных возможностей рассмотренных выше методов и средств неразрушающего контроля свидетельствуют о необходимости разработки новых подходов в области создания ИД для систем технического контроля и диагностики состояния стальных канатов.

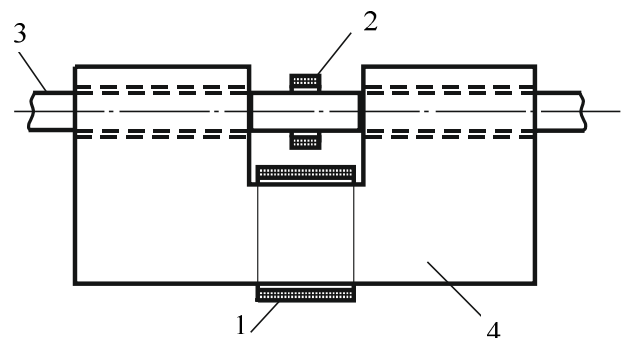


Рис. 3. ИД для метода НК переменным магнитным полем: 1 – катушка возбуждения (первичная обмотка); 2 – катушка сема (вторичная обмотка); 3 – стальной канат (ОК); 4 – ферромагнитный магнитопровод

# ПРИНЦИП ПОСТРОЕНИЯ «ГИБРИДНОГО» ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ДАТЧИКА

Обобщая особенности рассмотренных магнитных методов НК, можно отметить, что каждый из этих известных методов основан на каком-то одном физическом эффекте, который фактически и определяет как возможности самого метода, так и особенности его реализации.

Предлагается новый метод НК, который можно отнести к одной из возможных модификаций диагностирования по эффектам нелинейности, которые являются информативными из-за принципиально нелинейной функциональной связи между испытательным электромагнитным полем и откликом активной физической среды (ОК) [9]. Эта связь однозначно определяется функцией восприимчивости, отображающей физическое состояние активной физической среды по связям динамической и диссипативных подсистем и обеспечивает чувствительность эффектов нелинейности к дефектам ОК. В данном случае ОК представляется в виде концептуальной модели с двумя подсистемами: динамической и диссипативной. Динамическая подсистема моделирует воздействие внешнего испытательного электромагнитного поля и подачу энергии активации, а диссипативная – преобразовательные возможности активной физической среды. Такое представление ОК позволяет учесть все возможные пути получения информации о физическом состоянии системы за счет проявления ее электрических, магнитных, упругих и других свойств.

Применение подобного феноменологического подхода позволило выделить наиболее общие физические эффекты, дающие информацию о видах физического состояния ОК, и разработать новый метод и его схемотехническую реализацию, в которой используется одновременно несколько физических эффектов: 1 – влияние дефекта на характер пространственного распределения магнитного потока в среде; 2 – влияние дефекта на величину трансформаторной ЭДС; 3 – влияние дефекта на величину магнитомодуляционной ЭДС, обусловленную эффектом нелинейности. Фактически предлагаемый метод НК объединяет в себе потенциальные возможности трех магнитных методов НК: постоянного магнитного поля, переменного магнитного поля и феррозондового метода. Иными словами, новый тип «гибридного» ИД для НК СК фактически является магнитомодуляционным элементом и основан на базе феррозонда, использующего постоянное магнитное поле, переменные электрическое и магнитные поля [10, 11].

Магнитомодуляционные элементы характеризуются тем, что в их сердечниках всегда действуют, по крайней мере, два отличающихся по частоте магнитных поля, одно из которых обычно обусловлено источником питания переменного тока, а другое – входными (управляющими) сигналами. В отдельных случаях частота управляющих сигналов может быть равна нулю, что соответствует входным сигналам постоянного тока. Магнитомодуляционные элементы являются управляемыми ферромагнитными устройствами, действие которых основано на том, что одно из магнитных полей изменяет (модулирует) магнитное состояние сердечника для другого поля.

Следует подчеркнуть, что вследствие именно нелинейного характера кривой намагничивания ферромагнитных материалов (рис. 4) при наличии переменного поля либо магнитная индукция, либо напряженность поля, а часто и то и другое, имеют высшие гармоники, которые и содержат необходимую диагностическую информацию.

При отсутствии постоянного поля имеются лишь нечетные высшие гармоники (3-я, 5-я и т.д.). При наличии постоянного поля наряду с нечетными непременно появляются и четные гармоники (2-я, 4-я и т.д.). Например, форма несимметричной кривой  $b'$  на рис. 4 показывает, что при изменении по синусоидальному закону и наличии постоянного поля напряженность переменного поля и, следовательно, переменный ток содержат четные гармоники.

В отличие от традиционного феррозондового метода НК, использующего модулирующее воздействие переменного магнитного поля, источником которого является многовитковая катушка (магнитный диполь), «гибридный» метод НК основан на применении в качестве модулятора вибраторной антенны (электрический диполь), которая инициирует в ферромагнитной среде магнитоэлектрические процессы.

Конструктивно «гибридный» ИД для НК проволочных канатов представляет собой Ш-образную многоэлементную ферромагнитную систему (МФС) 1, дополненную длинномерным ферромагнитным элементом в виде стального каната, являющегося ОК 2 (рис. 5).

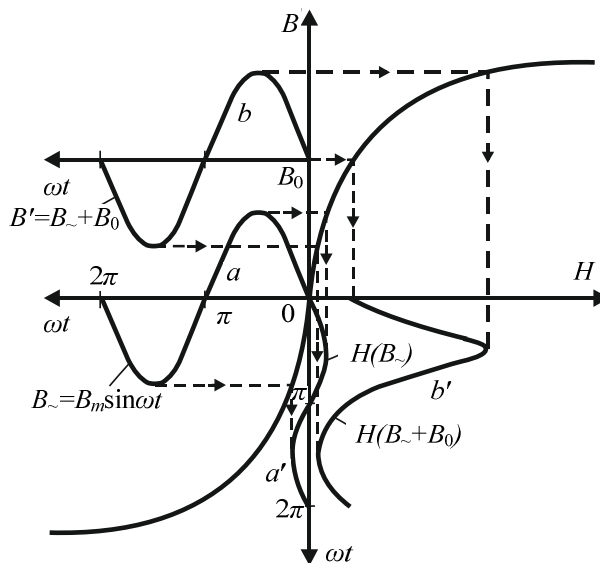


Рис. 4. Влияние постоянной составляющей индукции  $B_0$  на величину переменного тока в обмотке сердечника

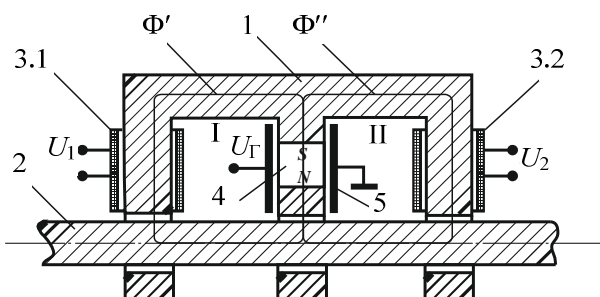


Рис. 5. Конструкция «гибридного» ИД

МФС включает в свой состав приемные катушки (ПК) 3.1 и 3.2.; подмагничивающий элемент (ПЭ) в виде постоянного магнита 4 и элемент «накачки» – модулятор 5. Элемент «накачки» является фактически вибраторной антенной, т.е. излучающей резонансной антенной конденсаторного типа с сосредоточенной емкостью  $C$ , возбуждаемой с помощью длинной линии источником синусоидального напряжения  $U_T$  [11]. Ш-образная МФС образует вместе с ОК два взаимосвязанных ферромагнитных контура (ФК) I и II, через которые определенным образом конфигурируются «гибридные» магнитные потоки  $\Phi'$  и  $\Phi''$ , возбуждаемые вибраторной антенной и ПЭ.

Исследуем взаимное влияние совмещенных магнитных полей (постоянных и переменных) в заданной МФС ИД, используя в качестве ОК эталонный образец стального каната (отсутствуют дефекты). В этом случае кривую намагниченности магнитопровода МФС можно представить в виде простой зависимости, учитывающей только нелинейность данной кривой намагниченности:

$$B = f(H_\Sigma) = f[H(t) + H_0], \quad (1)$$

где  $H_\Sigma$  – суперпозиция напряженностей постоянного магнитного поля  $H_0$  (подмагничивающее поле) магнита и переменного магнитного поля  $H(t)$  (поле возбуждения), создаваемого вибраторной антенной.

Конструктивные особенности вибраторной антенны позволяют реализовать режим заданного напряжения возбуждения, т.е. режим заданной индукции поля возбуждения. При этих условиях для электрического напряжения, подаваемого на вибраторную антенну, можем записать

$$u(t) = \frac{1}{f(C_A)} \times s \times \frac{dB}{dt}, \quad (2)$$

где  $s$  – эквивалентная площадь условного поперечного сечения центрального элемента магнитопровода МФС;  $B$  – магнитная индукция в центральном элементе магнитопровода МФС;  $f(C_A)$  – конструктивная функция, характеризующая зависимость амплитуды возбуждаемого магнитного поля в магнитопроводе МФС от конструктивных особенностей вибраторной антенны.

Интегрируя выражение (2), получим

$$B(t) = \frac{1}{s} \times f(C_A) \times \int u(t) \times dt \quad (3)$$

При питании вибраторной антенны заданным электрическим напряжением вида

$$u(t) = Um \cdot \cos \omega t$$

в соответствии с (3) получим

$$B'(t) = B'_m \sin \omega t \text{ и } B''(t) = B''_m \sin \omega t, \quad (4)$$

где  $B'_m = f(C_k) \cdot U_m / [\omega s_1]$  и  $B''_m = f(C_k) \cdot U_m / [\omega s_2]$ ;  $s_1$  и  $s_2$  – средние сечения соответственно ФК-I и ФК-II;  $f(C_k)$  – конструктивная функция, определяемая параметрами вибраторной антенны.

Магнитные индукции  $B'(t)$  и  $B''(t)$  в ФК-I и ФК-II фактически определяют изменяющиеся во времени

магнитные потоки соответственно через сечения  $s_1$  ФК-I и  $s_2$  ФК-II, которые, в свою очередь, наводят в каждой из ПК соответствующие ЭДС индукции:

$$\begin{aligned} e'(t) &= -w_1 \cdot \frac{d\Phi'}{dt} = w_1 \cdot s_1 \cdot \frac{dB'}{dt}; \\ e''(t) &= -w_2 \cdot \frac{d\Phi''}{dt} = w_2 \cdot s_2 \cdot \frac{dB''}{dt}, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $w_1$  и  $w_2$  – количество витков соответственно ПК-3.1 и ПК-3.2.

Рассмотрим более подробно особенности электро-динамических процессов, возникающих в ФК-I и ФК-II. Воспользуемся аппроксимацией зависимости  $B=f(H_\Sigma)$  укороченным полиномом третьей степени

$$B = f(H_\Sigma) = aH_\Sigma - bH_\Sigma^3,$$

где  $a$  и  $b$  – положительные коэффициенты аппроксимации, характеризующие соответственно конструктивные особенности и магнитные свойства магнитопровода МФС.

С учетом выражений (1) и (4) можем записать: для ФК-I:

$$\begin{aligned} B'(H_\Sigma) &= a_1 \cdot H_m \cdot \sin \omega t + a_1 \cdot H_0 - \\ &- b_1 [H_m^3 \cdot \sin^3 \omega t + 3 \cdot H_0 \cdot H_m^2 \cdot \sin^2 \omega t + \\ &+ 3 \cdot H_0^2 \cdot H_m \cdot \sin \omega t + H_0^3]; \end{aligned} \quad (6)$$

для ФК-II:

$$\begin{aligned} B''(H_\Sigma) &= a_2 \cdot H_m \cdot \sin \omega t + a_2 \cdot H_0 - \\ &- b_2 [H_m^3 \cdot \sin^3 \omega t + 3 \cdot H_0 \cdot H_m^2 \cdot \sin^2 \omega t + \\ &+ 3 \cdot H_0^2 \cdot H_m \cdot \sin \omega t + H_0^3]. \end{aligned} \quad (7)$$

После несложных математических преобразований выражений (6) и (7) для ФК-I и ФК-II соответственно получим:

$$\begin{aligned} \frac{dB'}{dt} &= a_1 \cdot \omega \cdot H_m \cdot \cos \omega t - 3 \cdot b_1 \cdot \omega \cdot H_0^2 \times \\ &\times H_m \cdot \cos \omega t - 6 \cdot b_1 \cdot \omega \cdot H_0 \cdot H_m^2 \cdot \sin 2\omega t; \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \frac{dB''}{dt} &= a_2 \cdot \omega \cdot H_m \cdot \cos \omega t - 3 \cdot b_2 \cdot \omega \cdot H_0^2 \times \\ &\times H_m \cdot \cos \omega t - 6 \cdot b_2 \cdot \omega \cdot H_0 \cdot H_m^2 \cdot \sin 2\omega t. \end{aligned} \quad (9)$$

Из анализа выражений (8) и (9) следует, что ЭДС индукции каждой из ПК будет содержать две составляющие, одна из которых является трансформаторной ЭДС, а другая – магнитомодуляционной ЭДС.

Для ПК-3.1 будет справедливо выражением вида

$$e'(t) = e'_T(t) + e'_M(t),$$

где  $e'_T(t) = a_1 \cdot w_1 \cdot s_1 \cdot \omega \cdot H_m \cdot \cos \omega t$  – трансформаторная ЭДС;  $e'_M(t) = 3 \cdot w_1 \cdot s_1 \cdot b_1 \cdot \omega \cdot H_0^2 \cdot H_m \cdot \cos \omega t - 6 \cdot w_1 \cdot s_1 \cdot b_1 \cdot \omega \cdot H_0 \cdot H_m^2 \cdot \sin 2\omega t$  – магнитомодуляционная ЭДС.

Для ФК-II имеем

$$e''(t) = e''T(t) + e''M(t),$$

где  $e''_T(t) = a_2 \cdot w_2 \cdot s_2 \cdot \omega \cdot H_m \cdot \cos \omega t$  – трансформаторная ЭДС;  $e''_M(t) = 3 \cdot w_2 \cdot s_2 \cdot b_2 \cdot \omega \cdot H_0^2 \cdot H_m \cdot \cos \omega t - 6 \cdot w_2 \cdot s_2 \cdot b_2 \cdot \omega \cdot H_0 \cdot H_m^2 \cdot \sin 2\omega t$  – магнитомодуляционная ЭДС.

Поскольку обмотки ПК-3.1 и ПК-3.2 включены последовательно-встречно, то, в общем случае величина напряжения небаланса (электрический сигнал с выхода ИД) при условии  $w_1=w_2=w_0$ ;  $s_1=s_2=s_0$  и  $l_1=l_2=l_0$ , т.е. в отсутствии дефектов (при эталонном ОК), будет определяться выражением

$$e_\Sigma(t) = e_{\Sigma T}(t) + e_{\Sigma M}(t), \quad (10)$$

где  $e_{\Sigma T}(t) = e'_T(t) - e''_T(t) = 0$  – разность двух трансформаторных ЭДС, наводимых соответствующими магнитными потоками в обмотках ПК-3.1 и ПК-3.2 от переменных полей возбуждения;  $e_{\Sigma M}(t) = e'_M(t) - e''_M(t) = 0$  – разность двух магнитомодуляционных ЭДС, наводимых модулированным магнитным полем соответственно в обмотках ПК-3.1 и ПК-3.2.

Иными словами, при использовании эталонного ОК и последовательно-встречном включении обмоток ПК-3.1 и ПК-3.2 обеспечивается отсутствие сигнала на выходе ИД, что означает градиентометрический режим функционирования ИД.

При рассмотрении варианта с рабочим ОК, имеющим дефекты типа ЛД и ПС, и с учетом того, что в общем случае  $H_0 \ll H_m$ , для ЭДС ИД имеем:

$$e_\Sigma(t) = \omega \cdot w_0 \cdot a_D \cdot s_D \cdot H_m \cdot \cos \omega t - 6 \cdot \omega \cdot w_0 \cdot b_D \cdot s_D \cdot H_0 \cdot H_m^2 \cdot \sin 2\omega t, \quad (11)$$

где  $a_D = (a_1 - a_2) = f(l_D)$  – условный параметр (УП), отражающий длину дефекта  $l_D$ ;  $s_D = (s_1 - s_2) = f(h_D)$  – УП, отражающий высоту дефекта  $h_D$ ;  $b_D = (b_1 - b_2) = f(\mu_D)$  – УП, отражающий магнитную проницаемость дефекта  $\mu_D$ .

В соответствии с полученным аналитическим выражением (11) выбирается необходимый алгоритм преобразования выходного сигнала ИД и соответствующая структура его аппаратной реализации, которые в своей совокупности позволяют без особых сложностей идентифицировать тип дефекта и определять его геометрические и физико-химические характеристики.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённые натурные исследования нового метода НК подтвердили эффективность использованного феноменологического подхода при его разработке и высокую информативность самого метода НК.

Дефектоскоп, использующий «гибридный» тип ИД, обладает малыми габаритами, малым весом и автономным питанием. При этом ОК не потребует дополнительного намагничивания до технического насыщения. Все это позволяет производить оперативную техническую диагностику на работающем оборудовании, что в свою очередь имеет огромное значение для нужд промышленной безопасности.

Широкое использование нового метода НК и «гибридного» типа ИД при дефектоскопическом контроле СК в составе уже существующих компьютеризированных диагностических систем обеспечит соответствующее повышение достоверности обнаружения ЛД и снижение погрешности измерения ПС СК за счет информационной избыточности и алгоритмизации обработки измерительной информации, что, в конечном счете, позволит реализовать детальный анализ результатов дефектоскопии и организовать соответствующий мониторинг за динамикой износа и повреждения СК.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Малиновский В.А. Стальные канаты. Одесса: Астропринт, 2001. 190 с.
2. Бережинский В.И., Шатило А.Н. Канаты шахтных подъемных установок. М.: Университетская книга, 2015. 232 с.
3. Хальфин М.Н. и др. Безопасная эксплуатация, контроль и браковка стальных канатов. Новочеркасск: НГТУ, 1995. 184 с.
4. Пузин В.С. Устройства контроля состояния стальных канатов. М.: LAP Lambert Academic Publishing, 2012. 152 с.
5. Неразрушающий контроль: справочник: в 8 т. / под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 6: в 3 кн. Кн. 1: Клюев В.В., Мужикский В.Ф., Горкунов Э.С., Щербинин В.Е. Магнитные методы контроля. Кн. 2: Филинов В.Н., Кеткович А.А., Филинов М.В. Оптический контроль. Кн. 3: Матвеев В.И. Радиоволновой контроль. 2-е изд., испр. М.: Машиностроение, 2006. 832 с.
6. Tian J., Zhou J., Wang H., Meng G. Literature review of research on the technology of wire rope nondestructive inspection in China and abroad. International Conference on Engineering Technology and Application (ICETA 2015). Volume 22, 2015. doi: org/ 10.1051/mateconf/20152203025.
7. Клюев В. В. Неразрушающий контроль и диагностика. Справочник. – М.: Машиностроение, 2003. 656 с.
8. Jomdecha C., Prateepasen A. Design of modified electromagnetic main-flux for steel wire rope inspection. NDT E Int. 2009;42:77–83. doi: 10.1016/j.ndteint.2007.10.006.
9. Брякин И.В. Феррозонд с парафазным возбуждением // Проблемы автоматизации и управления. Бишкек: Илим, 2012. №1. С. 105–116.
10. Брякин И.В. Магнитодинамический магнитометр для задач дефектоскопии // Мехатроника, автоматизация, управление. М: Новые технологии, 2013. №3. С. 35–41.
11. Брякин И.В. Электродинамический модулятор на базе С-антенны // Проблемы автоматизации и управления. Бишкек: Илим, 2012. №1. С. 117–127.

Поступила в редакцию 20 марта 2017 г.

#### INFORMATION IN ENGLISH

#### MEASURING SENSOR FOR SYSTEMS OF NON-DESTRUCTIVE TESTING OF STEEL ROPES

Ivan V. Bryakin

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

Igor V. Bochkarev

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

The results of the analytical review of well-known methods and technical means of nondestructive testing (NDT) of steel wire ropes are given. The operational capabilities and features of the functioning of this NDT equipment are considered. The results of the analysis showed that it is necessary to develop new approaches in the field of creating measuring sensors for the systems of technical control and diagnostics of steel ropes. The possibility of creating a new type of "hybrid" NDT method with extended functionality is substantiated on the basis of the ferrosonde. Unlike the traditional ferroprobe method, which uses the modulating action of an alternating magnetic field, the source of which is a multi-turn coil (magnetic dipole), the developed "hybrid" method is based on the use of a vibrator antenna (electric dipole) as a modulator, which initiates magnetoelectric processes in a ferromagnetic medium. In the proposed new method of NDT and its schematic implementation, several physical effects are used simultaneously: the effect of the defect on the character of the spatial distribution of the magnetic flux in the medium; the influence of the defect on the value of the transformer electromotive force; the influence of the defect on the magnitude of the magnetomodulation electromotive force. In fact, the proposed NDT method combines the features of three magnetic NDT methods: a constant magnetic field, an alternating magnetic field, and a ferro-probe method. Application of the proposed algorithmic processing of the measurement results of the output signal of the induction sensor makes it possible to identify the type of defect and to determine its geometric and physicochemical characteristics.

**Keywords:** Steel rope, non-destructive testing, defect, flaw detector, measuring sensor, magnetosensitive element, magnetic field, ferrosonde, modulator, vibrator antenna.

#### REFERENCES

1. Malinovsky V.A. Steel ropes. Odessa, Astroprint, 2001. 190 p.
2. Berezinsky V.I., Shatilo A.N. Ropes of mine hoisting installations. Moscow: University Book, 2015. 232 p.
3. Khalfin M.N., et al. Safe operation, control and rejection of steel ropes. Novocherkassk: NSTU, 1995. 184 p.
4. Puzin V.S. Control devices for the state of steel ropes. Moscow: LAP Lambert Academic Publishing, 2012. 152 p.
5. Non-destructive testing: Handbook: in 8 volumes / Under the general editorship of V.V. Klyuev. Vol. 6: in 3 books. Book. 1: Klyuev V.V., Muzhitsky V.F., Gorkunov E.S., Shcherbinin V.E. Magnetic methods of control. Book. 2: Filinov V.N., Ketkovich A.A., Filinov M.V. Optical control. Book. 3: Matveyev V.I. Radiowave control. 2 nd ed., Rev. Moscow: Mechanical Engineering, 2006. 832 p.
6. Tian J., Zhou J., Wang H., Meng G. Literature review of research on the technology of wire rope nondestructive inspection in China and abroad. International Conference on Engineering Technology and Application (ICETA 2015). Volume 22, 2015. doi.org/ 10.1051/mateconf/20152203025.
7. Klyuev V.V. Non-destructive testing and diagnostics. Reference book. Moscow: Machine-building, 2003. 656 p.
8. Jomdecha C., Prateepasen A. Design of modified electromagnetic main-flux for steel wire rope inspection. NDT E Int. 2009;42:77–83. doi: 10.1016/j.ndteint.2007.10.006.
9. Bryakin I.V. *Ferrozond s parafaznym vozbuзhdeniem* [Ferrozond with paraphase excitation]. Problems of automatics and control. Bishkek: Ilim, 2012, no. 1, pp. 105–116.
10. Bryakin I.V. *Magnitodinamicheskiy magnitometr dlya zadach defektoskopii* [Magnetodynamic magnetometer for flaw detection problems]. Mechatronics, automation, control. M: New technologies, 2013. no. 3, pp. 35–41.
11. Bryakin I.V. *Elektrodinamicheskiy modulyator na baze C-antenny* [Electrodynamic modulator based on the C-antenna]. Problems of automation and control. Bishkek: Ilim, 2012. no. 1, pp. 117–127.

Брякин И.В., Бочкарев И. В. Измерительный датчик для систем неразрушающего контроля стальных канатов // Электротехнические системы и комплексы. 2017. № 2 (35). С. 49–54. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-2\(35\)-49-54](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-2(35)-49-54)

Bryakin I.V., Bochkarev I.V. Measuring Sensor for Systems of Non-destructive Testing of Steel Ropes. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2017, no. 2 (35), pp. 49–54. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-2\(35\)-49-54](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-2(35)-49-54)