

Индукционный датчик определения локальных дефектов в стальных канатах

М. В. НЕМЦОВ¹, Г. Д. ТРИФАНОВ²

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
Москва, Россия, e-mail: m.nemtsov@yandex.ru

²Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия, e-mail: Kanat@pstu.ru

Рассмотрен магнитный метод обнаружения разрывов проволок в стальных канатах. Предложена и проанализирована математическая модель магнитного метода. Доказана возможность оптимизации параметров измерительного узла с индукционным датчиком с целью повышения достоверности обнаружения разрывов проволок.

Ключевые слова: стальной канат, дефектоскопия.

The magnetic method used for the discovery of wire ruptures in steel wire ropes is reviewed. A mathematical model of the magnetic method is proposed and analyzed. The possibility of the optimization of the measuring junction's parameters using an inductive sensor in order to raise the reliability of discovering ruptures in wires is proved.

Key words: steel wire rope, defectoscopy.

Подъемные канаты из стальной ферромагнитной проволоки в процессе эксплуатации деградируют. Проволоки истираются от механического взаимодействия друг с другом и с огибаемыми опорами, испытывают переменные растягивающие, изгибающие и крутильные деформации в условиях агрессивной окружающей среды. Критериями износа каната являются локальные дефекты – разрывы проволок. Накопление разрывов проволок провоцирует разрыв каната.

Для обнаружения разрывов проволок используют магнитные дефектоскопы. Обычно дефектоскопы изготавливают двухфункциональными для одновременного обнаружения разрывов проволок и измерения потери площади поперечного сечения каната по металлу (типовая конструкция магнитной цепи дефектоскопа на основе постоянных магнитов рассмотрена в [1]).

Контролируемый участок каната между магнитными полюсами намагничивается до индукции технического насыщения. При этом в месте разрыва проволоки над поверхностью каната образуется магнитное поле рассеяния. Наличие поля рассеяния, а следовательно, и разрыва проволоки, фиксируют датчики Холла или индукционные датчики (измерительные катушки индуктивности), расположенные вблизи поверхности каната в измерительных узлах [2, 3]. Электродвижущая сила (ЭДС), возбуждаемая между выводами датчика Холла, пропорциональна интенсивности поля рассеяния. Данная сила, индуцируемая в витках измерительной катушки, пропорциональна интенсивности поля рассеяния и скорости движения каната относительно неподвижного дефектоскопа.

Влияние числа разрывов проволок, а также распределения и скорости накопления разрывов проволок на прочность шахтных подъемных канатов различной конструкции рассмотрено в [4]. Там же отмечено, что трудность оценки запасов прочности ка-

натов заключается в «низком качестве обнаружения обрывов проволок на изношенных канатах современными канатными дефектоскопами». Результаты испытаний дефектоскопов (оценка отношения числа разрывов проволок, обнаруженных при инструментальном контроле отрезка изношенного каната, к числу разрывов проволок, обнаруженных после разборки этого отрезка) различных фирм приведены в [4]. Только фирма NDT Technologies Inc. (США) смогла преодолеть оценку >50 %.

Трудность проектирования эффективных измерительных узлов определяется малой интенсивностью поля рассеяния, локализацией поля в ограниченной области, шумами от неконтролируемых неоднородностей (механических повреждений, ржавчины и т. д.) в длительно работающем канате, конструктивными ограничениями расстояния h между поверхностью каната и измерительным узлом (обычно $h \geq 5$ мм).

В статье обосновывается возможность оптимизации параметров измерительного узла с индукционным датчиком для повышения достоверности обнаружения разрывов проволок, расположенных во внешнем слое стальных канатов. Для обоснования использована математическая модель магнитного поля рассеяния.

Описание математической модели магнитного поля рассеяния. Воспользуемся геометрической моделью каната закрытой конструкции, представляющей собой вставленные друг в друга цилиндры возрастающих диаметров (рис. 1). Цилиндры выполнены из проволок фасонного сечения. Коэффициент заполнения металлом площади поперечного сечения такого каната $k_3 > 0,85$. Заменяем реальный канат закрытой конструкции идеализированным с $k_3 = 1$ в виде однородного стального цилиндрического стержня.

Разместим контролируемый участок идеализированного каната 8 длиной l и диаметром d_k вдоль оси симметрии маг-

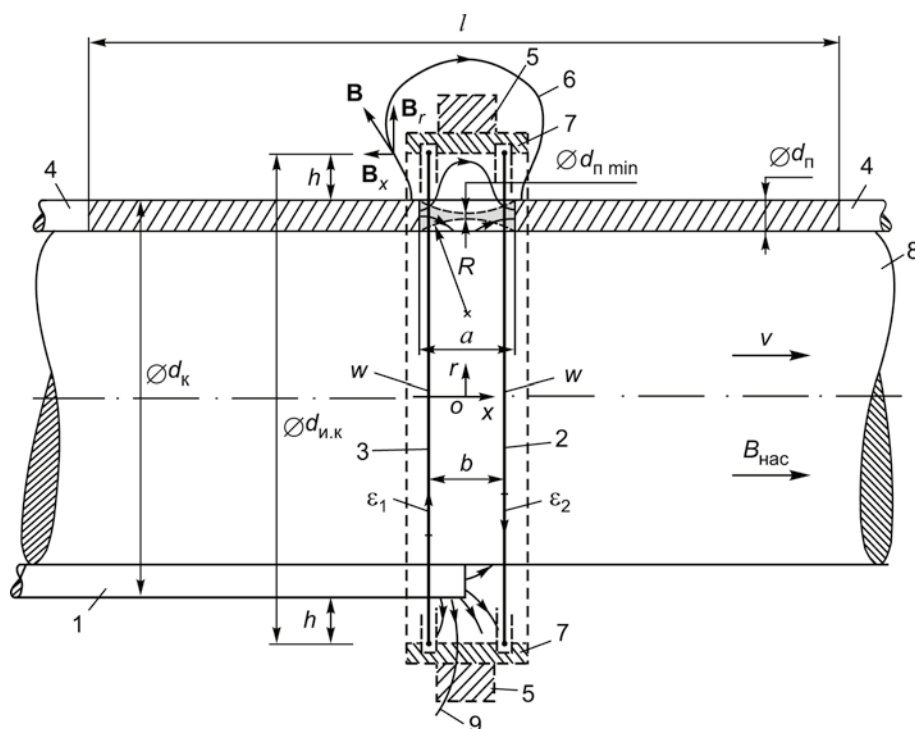


Рис. 1. Схема обнаружения разрывов проволок магнитным методом:
1, 4 – проволоки с разрывом; 2, 3 – части измерительной катушки; 5, 7 – части магнитопровода; 6, 9 – магнитные линии поля рассеяния; 8 – стальной канат

нитной цепи дефектоскопа. Исключим из внешнего слоя каната все проволоки диаметром $d_n \ll d_k$ кроме проволоки 4 с шириной разрыва в средней части между магнитными полюсами, соизмеримой с её диаметром $a \approx (0,5 \dots 3) d_n \approx 2 \dots 10$ мм, и проволоки 1 с шириной разрыва много больше её диаметра $a = \infty$. Оси разорванных проволок и каната параллельны. Измерительная катушка (ИК) состоит из двух частей 2, 3, каждая диаметром $d_{ик} = d_k + 2h$ и числом витков w . Две части катушки расположены вдоль оси каната симметрично относительно середины междуполюсного пространства на расстоянии b друг от друга. Идеализированный канат и разорванные проволоки намагничены по предельной статической петле гистерезиса до индукции технического насыщения $B_{нас}$ и относительной магнитной проницаемости $\mu_{нас}$. Чем больше степень насыщения, тем больше индукция $B_{нас}$ и меньше проницаемость $\mu_{нас}$. Относительная магнитная проницаемость среды (воздух) равна единице, в этой среде расположены канат, разорванные проволоки и измерительная катушка.

Рассмотрим математическую модель поля рассеяния в области разрыва проволоки 4. Магнитные состояния двух одинаковых участков разорванной намагниченной проволоки 4 длиной $(l-a)/2$ каждый и двух одинаковых цилиндрических соленоидов такой же длины и диаметра с линейной плотностью постоянного тока эквивалентны [5]:

$$J = B_{нас} / \mu_0, \quad (1)$$

где $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная.

Заменим эти участки проволоки 4 эквивалентными соленоидами, расположенными в среде с проницаемостью μ_1 на поверхности стального цилиндра с проницаемостью $\mu_{нас}$, и воспользуемся методом зеркальных изображений. Искомое поле рассеяния в однородной среде с проницаемостью μ_1 равно сумме полей токов в двух эквивалентных и в двух зеркальных соленоидах относительно поверхности стального цилиндра с линейной плотностью $k_3 J$:

$$0 \leq k_3 = (\mu_1 - \mu_{нас}) / (\mu_{нас} + \mu_1) \leq -1, \quad (2)$$

где k_3 – коэффициент экранирования поля рассеяния проводниками внутренних слоёв каната.

Чем больше магнитное насыщение каната, тем меньше проницаемость $\mu_{нас}$, меньше по абсолютному значению k_3 и больше интенсивность поля рассеяния. При абсолютном насыщении $\mu_{нас} = 1$ экранирование поля рассеяния проводниками внутренних слоёв каната отсутствует.

В [6] приведены формулы расчёта магнитного поля тока цилиндрического соленоида, расположенного в однородной среде. Адаптация этих формул к геометрии модели [7] с учётом формул (1), (2) позволяет рассчитать осевую B_x и радиальную B_r , составляющие магнитной индукции B поля рассеяния в любой точке, в частности в плоскости xr над поверхностью каната на высоте h расположения измерительной катушки при разрыве проволоки 4:

$$B_x(x) = \frac{B_{нас} d_n}{8\pi} \int_0^{\pi} \left(\int_{-l/2}^{-a/2} f_1 dx_1 + \int_{a/2}^{l/2} f_1 dx_1 \right) d\varphi;$$

$$B_r(x) = \frac{B_{нас} d_n}{4\pi} \int_0^{\pi} \left(\int_{-l/2}^{-a/2} f_2 dx_1 + \int_{a/2}^{l/2} f_2 dx_1 \right) d\varphi;$$

$$f_1 = \left[(d_n - (2h + d_n) \cos \varphi) / c_1^{3/2} \right] + \left\{ [k_3 (d_n - (2h + 3d_n) \cos \varphi)] / c_2^{3/2} \right\};$$

$$f_2 = \left\{ [(x - x_1) \cos \varphi] / c_1^{3/2} \right\} + \left\{ [k_3 (x - x_1) \cos \varphi] / c_2^{3/2} \right\};$$

$$c_1 = (x - x_1)^2 + [h + (d_n/2)]^2 + (d_n/2)^2 - d_n [h + (d_n/2)] \cos \varphi;$$

$$c_2 = (x - x_1)^2 + [h + (3d_n/2)]^2 + (d_n/2)^2 - d_n [h + (3d_n/2)] \cos \varphi,$$

где x_1 – координата вдоль оси цилиндрического соленоида.

Математическая модель поля рассеяния при разрыве проволоки 1 примет вид:

$$B_x(x) = \frac{B_{\text{нас}} d_{\text{п}}}{8\pi} \int_{-l/2}^0 \int_0^{\pi} f_1 dx_1 d\varphi;$$

$$B_r(x) = \frac{B_{\text{нас}} d_{\text{п}}}{4\pi} \int_{-l/2}^0 \int_0^{\pi} f_2 dx_1 d\varphi.$$

Параметры измерительной катушки. При движении каната со скоростью v относительно неподвижного дефектоскопа в витках ИК индуцируется ЭДС, пропорциональная скорости и радиальной составляющей магнитной индукции B_r поля рассеяния. Параметры ИК должны обеспечивать максимальное значение ЭДС для структуры магнитных линий поля рассеяния. Структура магнитных линий зависит от ширины разрыва проволоки.

Ширина разрыва проволоки 4 соизмерима с её диаметром. Магнитные линии 6 поля рассеяния замыкаются через воздушный промежуток между торцами разорванной проволоки (см. рис. 1). Характер зависимости $B_r(x)$ приведён на рис. 2, кривая 1. Для обнаружения таких разрывов проволоки оптимальной является ИК, части 2, 3 которой включены последовательно и встречно при расстоянии между ними $b_{\text{опт}} = \Delta_1$, где Δ_1 – расстояние между экстремумами зависимости $B_r(x)$. В момент времени пространственного совпадения $b_{\text{опт}}$ и Δ_1 ЭДС, индуцируемые во всех витках одной ε_1 и другой ε_2 частей ИК, имеют максимальные значения и суммируются.

В табл. 1 приведены значения оптимальной ширины ИК $b_{\text{опт}}$ при различных значениях высоты h расположения ИК над поверхностью каната и при ширине разрыва проволоки a .

Таблица 1

Оптимальная ширина ИК для определения разрыва проволоки диаметром $d_{\text{п}}=3,36$ мм, расположенной во внешнем слое идеализированного каната

h , мм	$b_{\text{опт}}$, мм при различной ширине разрыва проволоки a , мм			
	2	6	10	∞
3	4	6,5	10	5,5
5	6	7,5	10,5	8
7	7,5	9	11	10

Ширина разрыва проволоки 1 много больше её диаметра. Магнитные линии поля рассеяния 9 замыкаются через воздушный промежуток между торцом разорванной проволоки (см. рис. 1) и элементами магнитной цепи дефектоскопа. Характер зависимости $B_r(x)$ приведён на рис. 2, кривая 2. Зависимость $B_r(x)$ имеет только положительные значения. Поэтому при движении каната со скоростью v относительно неподвижного дефектоскопа ЭДС, индуцируемые в проводниках одной ε_1 и другой ε_2 частей ИК, включённых встречно, имеют встречное направление действия. Разность ЭДС бу-

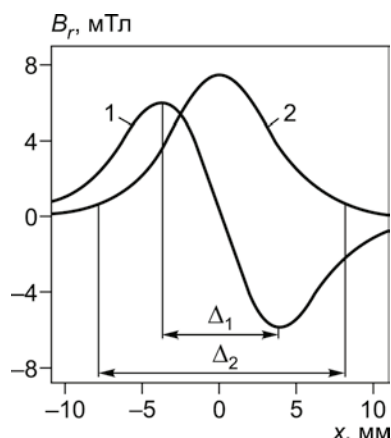


Рис. 2. Зависимости $B_r(x)$ при $h=5$ мм, $d_{\text{п}}=3,36$ мм, $l=80$ мм, $B_{\text{нас}}=0,8$ Тл, $\mu_{\text{нас}}=50$: 1 – $a=6$ мм; 2 – $a=\infty$

дет наибольшей при ширине ИК $b_{\text{опт}}=0,5\Delta_2$, где Δ_2 – протяжённость зависимости $B_r(x)$ на уровне $0,1B_{r\text{max}}$ (см. табл. 1).

Анализ математической модели поля рассеяния показывает, что значение оптимальной ширины $b_{\text{опт}}$ ИК зависит только от высоты h её расположения над поверхностью каната и ширины a разрыва проволоки и не зависит от степени магнитного насыщения $B_{\text{нас}}$ и диаметра проволоки в пределах $2 \leq d_{\text{п}} \leq 4$ мм. Увеличение (уменьшение) магнитного насыщения и диаметра проволоки увеличивает (уменьшает) лишь интенсивность поля рассеяния и практически не влияет на его пространственную структуру (табл. 2).

Таблица 2

Зависимость интенсивности поля рассеяния от диаметра проволоки при $B_{\text{нас}}=0,8$ Тл, $\mu_{\text{нас}}=50$

h , мм	$d_{\text{п}}$, мм	$B_{r\text{max}}$, мТл, при различной ширине разрыва проволоки a , мм			
		2	6	10	∞
3	2	3,93	7,20	7,52	7,43
	3,5	9,00	18,2	20,0	19,9
5	2	0,98	2,19	2,58	2,61
	3,5	2,95	6,48	7,90	8,17
7	2	0,35	0,90	1,14	1,22
	3,5	1,11	2,85	3,77	4,20

Использование набора ИК конструктивно затруднительно. Представляется разумным применение одной ИК шириной, равной среднему значению $b_{\text{ср}}$, из оптимальных значений в табл. 1. При $h=3; 5; 7$ мм среднее значение ширины ИК $b_{\text{ср}}=6,5; 8; 9,4$ мм, соответственно.

Параметры измерительного узла. Эффективность обнаружения разрывов проволоки с помощью ИК ограничена малой интенсивностью поля рассеяния в воздушной среде. Повысить эффективность позволяет измерительный узел, в котором есть ИК и магнитопровод из ферромагнитного материала. Применение магнитопроводов уменьшает длину участков магнитных линий поля рассеяния в воздухе, увеличивая его интенсивность.

Интенсивность поля рассеяния с магнитными линиями 6 увеличится при размещении ИК в пазах тонкостенно-

го цилиндрического магнитопровода 7 шириной $(2...2,5)b_{\text{ср}}$, а поля с магнитными линиями 9 – ещё и соединением магнитопровода 7 с элементами магнитной цепи дефектоскопа замыкающим магнитопроводом 5 (см. рис. 1).

Полному разрыву проволоки, возможно, предшествует её локальное утончение. На рис. 1 показана геометрическая модель утончения (затемнение площади между двумя пунктирными линиями) с изменяющимся на участке $(-a/2) \leq x \leq a/2$ диаметром проволоки

$$d_n(x) = d_{n \min} + 2 [R - (R^2 - x^2)^{1/2}];$$

$$R = [a^2 + (d_n - d_{n \min})^2] / [4 (d_n - d_{n \min})],$$

где $d_{n \min}$ – минимальный диаметр проволоки; R – радиус дуги профиля утончения.

Анализ структуры полей рассеяния при разрыве проволоки (рис. 2, кривая 1) и при её локальном утончении показывает их геометрическое подобие, а в некоторых случаях – близкие значения интенсивности. Это необходимо учитывать при расшифровке канатограмм.

Результаты эксперимента. Проведены сравнительные испытания серийного дефектоскопа ИНТРОС [2] с датчиком Холла в измерительном узле и опытным образцом дефектоскопа, изготовленного в ООО «Региональный канатный центр», с параметрами индукционного датчика $w=100$, $b=7$ мм, $h=6$ мм. Испытания проведены на контрольном отрезке длиной 5,5 м шахтного подъёмного каната однослойной свивки диаметром 63 мм со стальным сердечником, номинальной площадью поперечного сечения 1890 мм² и искусственными локальными дефектами во внешнем слое:

разрез шириной 3 мм одной проволоки диаметром $d_n=3,36$ мм и частично 1/4 на двух соседних (дефект 1);

разрез шириной 10 мм двух проволок диаметром $d_n=3,36$ мм и частично 1/4 на двух соседних (дефект 2).

Дефектоскоп ИНТРОС не обнаруживает дефект 1, но обнаруживает дефект 2 после тщательной настройки. Дефектоскоп с индукционным датчиком надёжно фиксирует оба дефекта.

Замечание. Число разрывов наружных проволок обычно превалирует над числом разрывов внутренних проволок в однослойных прядевых канатах с органическим сердечником

и может быть соизмеримо и даже меньше при использовании стального сердечника. Обоснованность параметров индукционного датчика, приведённая в статье, для обнаружения разрывов внутренних проволок недостаточна и должна дополняться экспериментом.

Заключение. Предложена математическая модель магнитного поля рассеяния, возникающего в области разрыва проволок внешнего слоя над поверхностью стального каната закрытой конструкции. На основе анализа модели сформулированы общие требования к геометрическим и электромагнитным параметрам измерительного узла с индукционным датчиком, позволяющие повысить достоверность обнаружения разрывов проволок. Результаты анализа справедливы также и для канатов других конструкций.

Л и т е р а т у р а

1. **Немцов М. В., Трифанов Г. Д.** Метрологическое обеспечение магнитной дефектоскопии стальных канатов // Измерительная техника. 2016. № 11. С. 43–46.
2. **Пат. 2204129 РФ.** Способ неразрушающего контроля площади поперечного сечения и обнаружения локальных дефектов протяжённых ферромагнитных объектов и устройство для его осуществления / В. В. Сухоруков, С. Б. Белицкий // Изобретения. Полезные модели. 2003. № 33.
3. **Пат. US 5565771 (А) Канада.** Apparatus for increasing linear resolution of electromagnetic wire rope testing / Michel H., Frank K. 1996. [Электрон. ресурс] <https://www.google.com/patents/US5565771> (дата обращения: 20.10.2016).
4. **Бережинский В. И., Шатило О. Н.** Канаты шахтных подъёмных установок. М.: Изд-во «Университетская книга», 2015.
5. **Нетушил А. В., Поливанов К. М.** Основы электротехники. Ч. 3. М.: Энергия, 1956.
6. **Немцов М. В.** Справочник по расчёту параметров катушек индуктивности. М.: Энергоатомиздат, 1989.
7. **Немцов М. В., Трифанов Г. Д.** Магнитный метод обнаружения разрывов проволок в стальных канатах // Электротехника. 2017. № 5. С. 46–49.

Дата принятия: 27.07.2017.

