

# ПОВЫШЕНИЕ СООТНОШЕНИЯ СИГНАЛ/ПОМЕХА ПРИ ВИХРЕТОВОМ КОНТРОЛЕ ЗА СЧЕТ СОЗДАНИЯ НЕОДНОРОДНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ



**А. В. Семенов,**  
ООО «ИНТРОН ПЛЮС»,  
Москва, Россия.  
E-mail: asemenov@intron.ru

На примере контроля мультистрендовых канатов рассмотрены способы повышения соотношения сигнал/помеха при вихретоковом контроле. На основе результатов численного моделирования проведен сравнительный анализ проходных вихретоковых преобразователей (ВП) с различной протяженностью возбуждающей катушки. ВП с узкой возбуждающей катушкой имеет выраженную зависимость соотношения сигналов от дефектов в разных слоях от положения измерительных катушек. Использование измерительных катушек, расположенных на разном расстоянии от центра возбуждающей катушки, позволяет повысить соотношение сигнал/помеха за счет разделения в радиальном направлении частей объекта, преимущественно формирующих сигналы и помехи в разных измерительных катушках. Применение вместо проходных измерительных катушек системы накладных измерительных катушек позволяет повысить соотношение сигнал/помеха за счет разделения в азимутальном направлении частей объекта, преимущественно формирующих сигналы и помехи в каждой из накладных измерительных катушек.

**Ключевые слова:** неразрушающий контроль, вихретоковый контроль, стрендовые канаты, математическое моделирование, помеха.

A. V. Semenov (INTRON PLUS, Ltd, Moscow, Russia)

## INCREASING THE SIGNAL-TO-NOISE RATIO IN EDDY CURRENT NDT BY CREATING OF AN INHOMOGENEOUS ELECTROMAGNETIC FIELD

In this article, using the example of multi-strand rope inspection, the ways of increasing the signal-to-noise ratio in eddy current control are considered. Based on the results of numerical simulation, a comparative analysis of encircling eddy current probes with different lengths of the exciting coil is carried out. A probe with a narrow exciting coil has a pronounced dependence of the ratio of signals from defects in different layers on the position of the measuring coils. The use of measuring coils located at different distances from the center of the exciting coil makes it possible to increase the signal-to-noise ratio due to the separation in the radial direction of the parts of the object that mainly form signals and noise in different measuring coils. The use of a system of surface measuring coils instead of encircling measuring coils makes it possible to increase the signal-to-noise ratio due to the separation in the azimuthal direction of the parts of the object that mainly form signals and noise in each of the surface measuring coils.

**Keywords:** nondestructive testing, eddy current testing, multistrand stay cables, parallel strand system, mathematical modeling, signal-to-noise ratio.

Статья поступила в редакцию 14.06.2022

Received 14.06.2022

### Введение

В последние десятилетия получили широкое распространение так называемые мультистрендовые канаты. Такие канаты состоят из параллельных прядей, часто называемых стрендами. Основной сферой применения мультистрендовых канатов являются ванты, т.е. неподвижные канаты, предназначенные для удержания различных конструкций.

Широкое распространение вантовые системы на основе мультистрендовых канатов получили, в частности, в области строительства вантовых мостов. По мере увеличения количества таких объектов и их неизбежного старения задача неразрушающего контроля такого типа канатов будет становиться все более актуальной. Одним из возможных методов неразрушающего контроля стрендо-

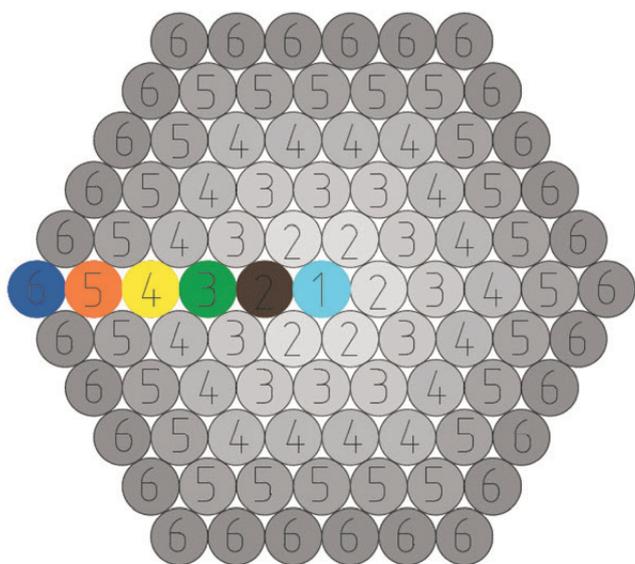


вых канатов является вихретоковый метод, обладающий такими достоинствами, как высокая производительность, относительно малая масса преобразователя, бесконтактность. Однако использование вихретокового метода осложняют помехи, в частности от структурных неоднородностей стали [1, 2]. Опыты показывают, что на фоне помех особенно сложно обнаруживать сигналы от дефектов, расположенных во внутренних слоях каната. Указанная проблема характерна и для других объектов, особенно изготовленных из ферромагнитных материалов.

**Описание математической модели**

Для поиска возможных путей повышения достоверности вихретокового контроля была разработана численная модель [4], позволяющая моделировать вихретоковый контроль стрендовых канатов. Модель стрендового каната состояла из проводящих стержней, электрически изолированных друг от друга. Стренды в каждом слое каната располагались по сторонам шестигранника. В качестве примера на рис. 1 показано поперечное сечение модели каната, содержащего 91 стренд и состоящего из шести слоев. Были реализованы модели канатов, состоящих из разного количества стрендов (см. таблицу). Реализованные модели покрывают весь диапазон стрендовых канатов, применяемых на большинстве реальных объектов.

В процессе контроля *вихретоковый преобразователь* (ВТП) перемещают вдоль каната, при этом изменение в пространстве свойств каната, в частности вызванное дефектом, модулирует сигнал ВТП.



**Рис. 1. Поперечное сечение модели каната, содержащего 91 стренд:**  
1 – 6 – номера слоев

**Структура моделей стрендовых канатов**

Число слоев стрендов	Число стрендов	Распределение стрендов по слоям (от центрального к внешнему)
1	1	1
2	7	1, 6
3	19	1, 6, 12
4	37	1, 6, 12, 18
5	61	1, 6, 12, 18, 24
6	91	1, 6, 12, 18, 24, 30

Для получения модулирующего сигнала от дефекта проводили расчеты для моделей канатов, содержащих дефекты на различном расстоянии от ВТП вдоль оси каната.

Диаметр возбуждающих и измерительных катушек рассмотренных далее ВТП был выбран исходя из размеров каната, содержащего максимальное число стрендов [1], и составлял 300 мм.

Существуют различные виды дефектов канатов, в частности дефекты, обусловленные обрывами отдельных стрендов [1]. В данной работе рассмотрены методы повышения соотношения сигнал/помеха для *локальных дефектов* (ЛД) и распределенных дефектов [3].

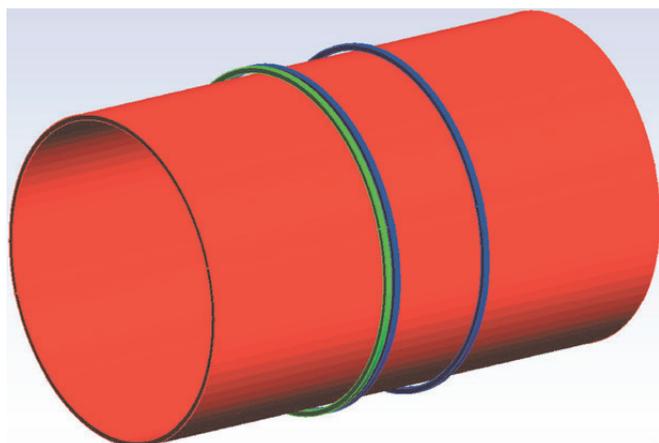
**Сужение зоны контроля в радиальном направлении**

*Локальные дефекты*

Модель ЛД представляла собой участок каната, в котором один стренд прерывается на длину 50 мм. Были реализованы модели, содержащие прерывающийся стренд в различных слоях каната.

Для обнаружения локальных дефектов использовали дифференциальный проходной трансформаторный ВТП. Встречно включенные измерительные катушки были смещены на равные расстояния в разные стороны от центра возбуждающей катушки.

Для анализа сигналов дифференциального ВТП применяли нормированную разность напряжений на измерительных катушках (было принято, что измерительные катушки подключены к измерительному тракту, имеющему бесконечно большое сопротивление, в связи с чем можно считать, что напряжение на измерительной катушке равно ЭДС,



**Рис. 2. ВТП с протяженной возбуждающей катушкой:** красный цвет – возбуждающая катушка; синий – катушки для обнаружения ЛД; зеленый – катушка для измерения ПС (потери площади металлического сечения каната)

наведенной в катушке индуктивности, взятой с обратным знаком  $\dot{U} = -\dot{E}$ ):

$$\Delta \dot{U}_{\text{вн}^*} = \frac{\dot{U}_1 - \dot{U}_2}{\dot{U}_0}, \quad (1)$$

где  $\dot{U}_1$  и  $\dot{U}_2$  – напряжения на дифференциально включенных измерительных катушках;  $\dot{U}_0$  – напряжение на одной измерительной катушке на бездефектном объекте контроля.

Традиционно [5] при контроле протяженных объектов применяется ВТП на основе протяженной катушки возбуждения (рис. 2), обеспечивающей однородное поле в центральной области преобразователя. Безусловным достоинством данного ВТП является слабая чувствительность к перемещениям объекта контроля в поперечном направлении.

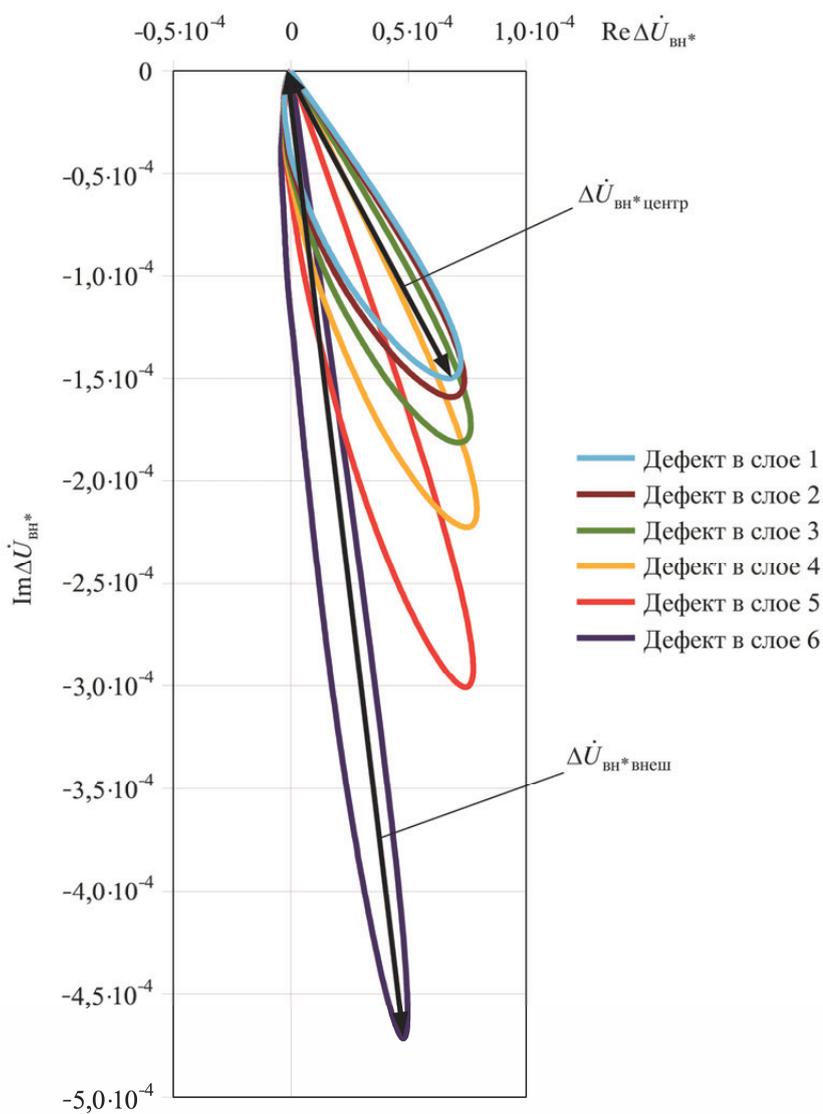
На рис. 3 показаны годографы  $\Delta \dot{U}_{\text{вн}^*}$ , полученные при моделировании сканирования области ЛД каната, состоящего из 91 стренда, дифференциальным ВТП на основе протяженной катушки возбуждения, расстояние между измерительными катушками которого составляло 100 мм. Годографы соответствуют перемещению ЛД от центра ВТП в бесконечность. Видно, что сигнал от ЛД во внешнем слое (слой 6) намного больше сигнала от ЛД в центральном слое (слой 1).

Для количественной оценки степени отличия сигналов от внутренних и внешних дефектов использовалась расчетная величина (далее соотношение сигналов внешнего и центрального дефектов):

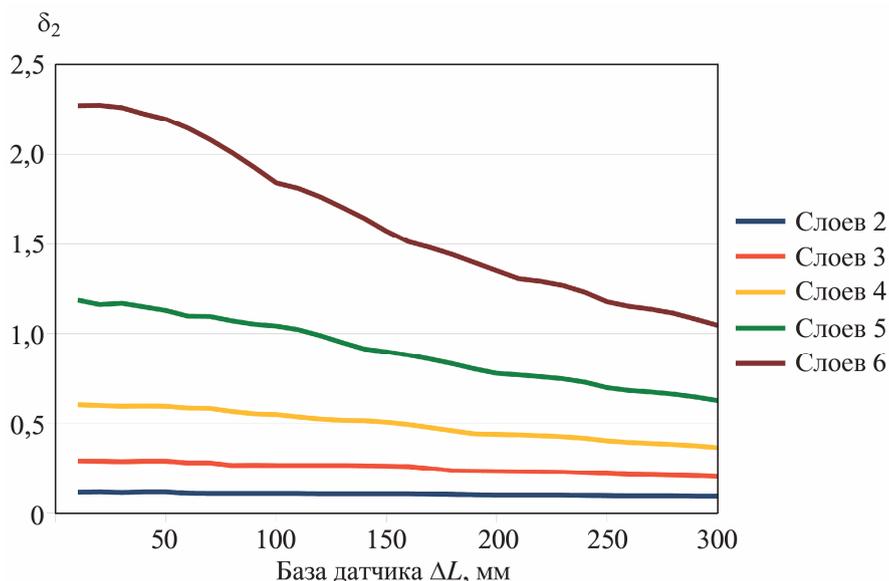
$$\delta_2 = \left( \Delta U_{\text{вн}^* \text{внеш}} - \Delta U_{\text{вн}^* \text{центр}} \right) / \Delta U_{\text{вн}^* \text{центр}}, \quad (2)$$

где  $\Delta U_{\text{вн}^* \text{внеш}}$  – модуль амплитуды сигнала от дефекта во внешнем слое;  $\Delta U_{\text{вн}^* \text{центр}}$  – модуль амплитуды сигнала от дефекта в центральном слое.

На рис. 4 показана зависимость соотношения сигналов внешнего и центрального ЛД от расстояния между измерительными катушками дифференциального ВТП (базы датчика). Видно, что при расположении измерительных катушек в центральной зоне возбуждающей катушки (зоне максимальной однородности поля) разница амплитуд



**Рис. 3. Годограф  $\Delta \dot{U}_{\text{вн}^*}$  дифференциального ВТП с протяженной катушкой возбуждения, база 100 мм. Канат из 91 стренда,  $\mu_r = 2000$**



**Рис. 4. Влияние базы дифференциального ВТП с протяженной катушкой возбуждения на соотношение сигналов  $\delta_2$  от ЛД во внешнем и центральном слоях ( $\mu_r = 2000$ )**

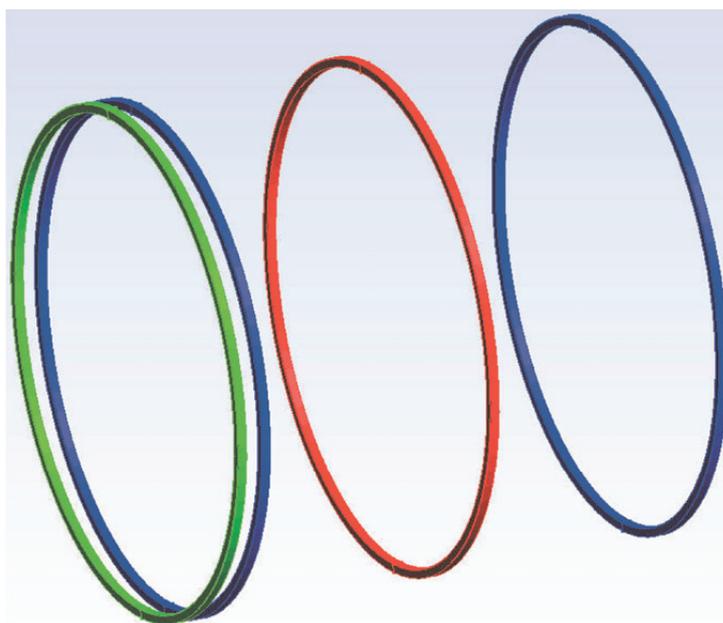
сигналов от ЛД во внешнем и центральном слоях для каната, содержащего шесть слоев, более чем в 2 раза превышает сигнал от ЛД в центральном слое.

Исходя из рис. 3 и 4, можно предположить, что составляющая помехи, которая обусловлена схожим с моделируемым дефектом изменением электромагнитных свойств, также зависит от глубины его залегания в канате. В таком случае неоднородность электромагнитных свойств во внешнем слое будет вносить намного большую помеху, чем неоднородность электромагнитных свойств во внутренних слоях. Таким образом, при использовании создающей однородное электромагнитное поле протяженной возбуждающей катушки вызванная внешними слоями помеха будет скрывать сигналы от дефектов во внутренних слоях.

Устранить указанный недостаток позволяет применение ВТП, создающего неоднородное поле возбуждения. Например, может быть использована «узкая» катушка возбуждения, протяженность которой в осевом направлении намного меньше ее диаметра. На рис. 5 показана математическая модель такого ВТП.

Результаты моделирования показывают, что для ВТП на основе узкой катушки возбуждения соотношение сигналов от дефектов в разных слоях имеет выраженную зависимость от расстояния между измеритель-

ными катушками (базы ВТП). В качестве примера на рис. 6 и 7 приведены годографы  $\Delta \dot{U}_{\text{вн}}^*$ , полученные при моделировании сканирования области ЛД каната, состоящего из 91 стренда, дифференциальными ВТП на основе узкой катушки возбуждения, расстояние между измерительными катушками которых составляло 100 и 360 мм соответственно. Видно, что если на рис. 6 сигналы отличаются значительно, то на рис. 7 амплитуды сигналов близки.



**Рис. 5. ВТП на основе «узкой» катушки возбуждения:** красный цвет – возбуждающая катушка; синий – катушки для обнаружения ЛД; зеленый – катушка для измерения ПС

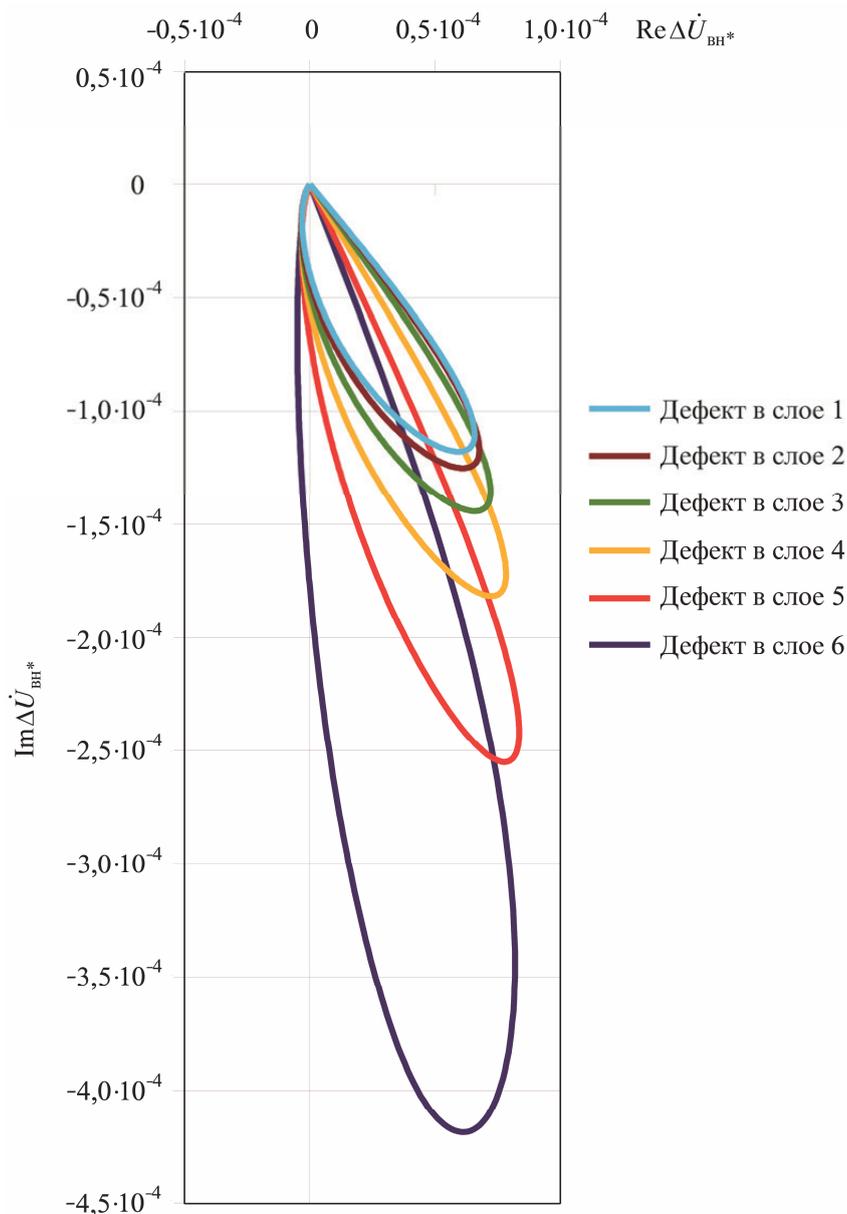


Рис. 6. Годограф  $\Delta \dot{U}_{\text{вн}}^*$  дифференциального ВТП с «узкой» катушкой возбуждения, база 100 мм. Канат из 91 стренда,  $\mu_r = 2000$

На рис. 8 приведена зависимость соотношения сигналов внешнего и центрального ЛД от расстояния между измерительными катушками дифференциального ВТП. Видно, что существует диапазон значений базы датчика (базы значительно меньше диаметра ВТП), где сигнал от дефекта во внешнем слое намного превышает сигнал от дефекта в центральном слое. В случае использования такого датчика сигнал и помеху преимущественно будут формировать внешние слои каната. Также существует диапазон значений базы датчика (базы, значительно превышающие диаметр ВТП), где сигнал от дефекта в центральном слое намного превышает

сигнал от дефекта во внешнем слое. В случае использования такого датчика сигнал и помеху преимущественно будут формировать внутренние слои каната. Таким образом, применение датчика, имеющего несколько пар измерительных катушек, расположенных на разном расстоянии от центра возбуждающей катушки, позволяет повысить соотношение сигнал/помеха за счет разделения в радиальном направлении частей объекта, преимущественно формирующих сигналы и помехи в каждой из пар измерительных катушек.

Как частный случай может быть использован ВТП с одной парой измерительных катушек, распо-

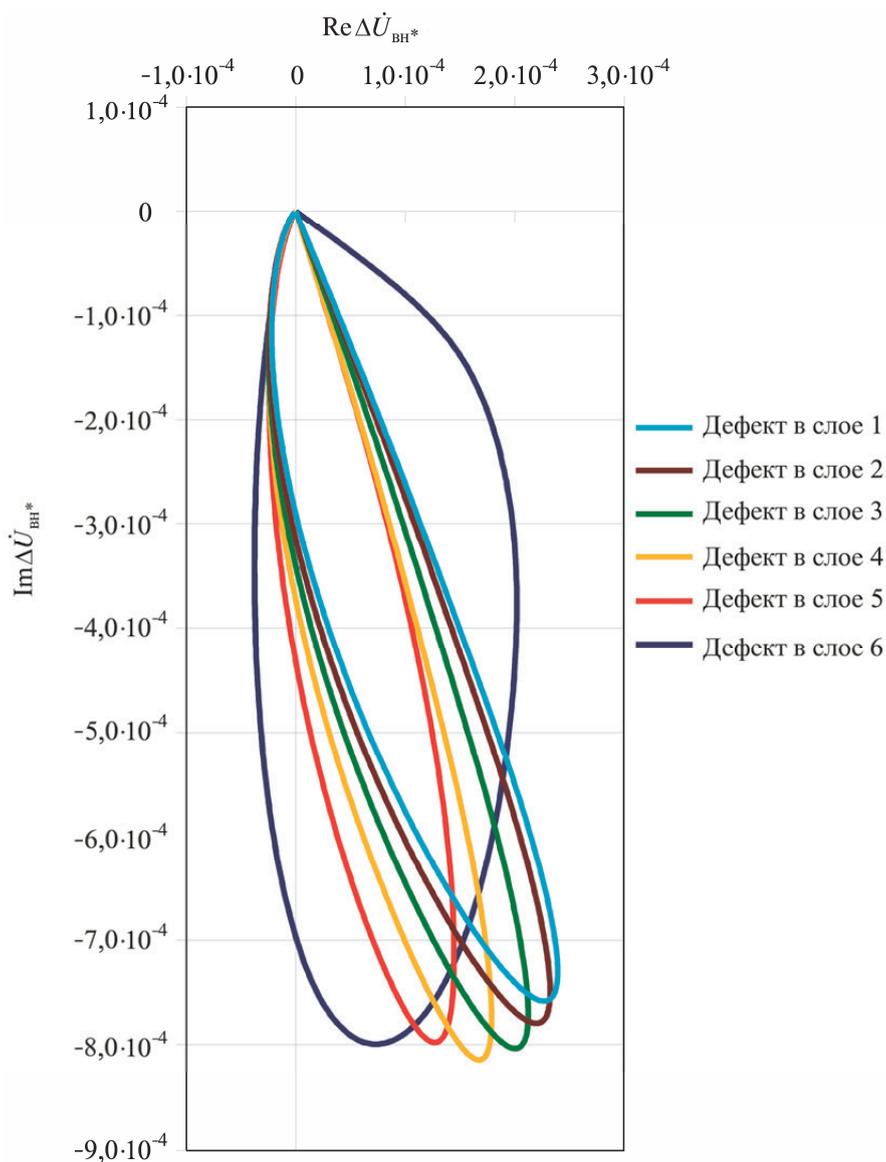


Рис. 7. Годограф  $\Delta \dot{U}_{\text{вн}}^*$  дифференциального ВТП с «узкой» катушкой возбуждения, база 360 мм. Канат из 91 стренда,  $\mu_r = 2000$

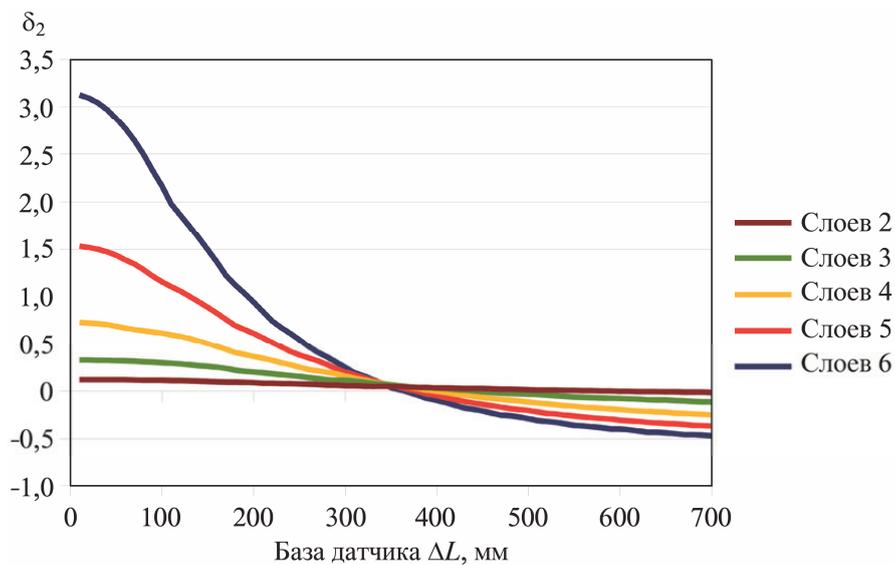


Рис. 8. Влияние базы дифференциального ВТП с узкой катушкой возбуждения на соотношение сигналов от ЛД  $\delta_2$  во внешнем и центральном слоях ( $\mu_r = 2000$ )

ложенных на расстоянии, обеспечивающем равную чувствительность к ЛД во внешних и внутренних слоях. При таком подходе порог чувствительности не будет зависеть от положения ЛД в сечении каната, т.е. будет решена проблема повышенной вероятности пропуска внутренних ЛД.

### Распределенные дефекты

Также было проведено моделирование процесса контроля каната в случае наличия распределенных дефектов каната в виде протяженной *потери* площади металлического *сечения* каната (ПС). Модель распределенного дефекта представляла собой участок каната, в котором полностью отсутствует один стренд в одном из слоев каната.

Для обнаружения ПС использовался абсолютный проходной трансформаторный ВТП, измерительная катушка которого расположена в центре возбуждающей катушки или смещена от центра возбуждающей катушки вдоль оси каната.

Для анализа сигналов абсолютного ВТП использовалась следующая величина:

$$\Delta \dot{U}_{\text{вн}^*} = \frac{\dot{U} - \dot{U}_0}{U_0}, \quad (3)$$

где  $\dot{U}$  – напряжение на измерительной катушке;  $\dot{U}_0$  – напряжение на измерительной катушке на бездефектном объекте контроля.

Результаты моделирования показали, что использование неоднородного поля позволяет повысить соотношение сигнал/помеха и при обнаружении ПС.

Так, на рис. 9 показана зависимость соотношения сигналов ПС во внешнем и центральном слоях (2) от расстояния между измерительной катушкой и центром возбуждающей катушки абсолютного ВТП на основе протяженной катушки возбуждения.

Видно, что разница сигналов абсолютного ВТП от ПС во внешнем и центральном слоях каната, содержащего шесть слоев, составляет примерно 25 % сигнала от ПС в центральном слое. Таким образом, можно предположить, что все слои каната вносят сопоставимый вклад в помеху. Кроме того, использование абсолютного ВТП на основе протяженной катушки возбуждения сопряжено со значительной дополнительной погрешностью измерения ПС, вызванной зависимостью величины сигнала от расположения дефекта по сечению ванты.

На рис. 10 показана зависимость соотношения сигналов ПС во внешнем и центральном слоях (2) от расстояния между измерительной катушкой и центром возбуждающей катушки абсолютного ВТП на основе узкой катушки возбуждения.

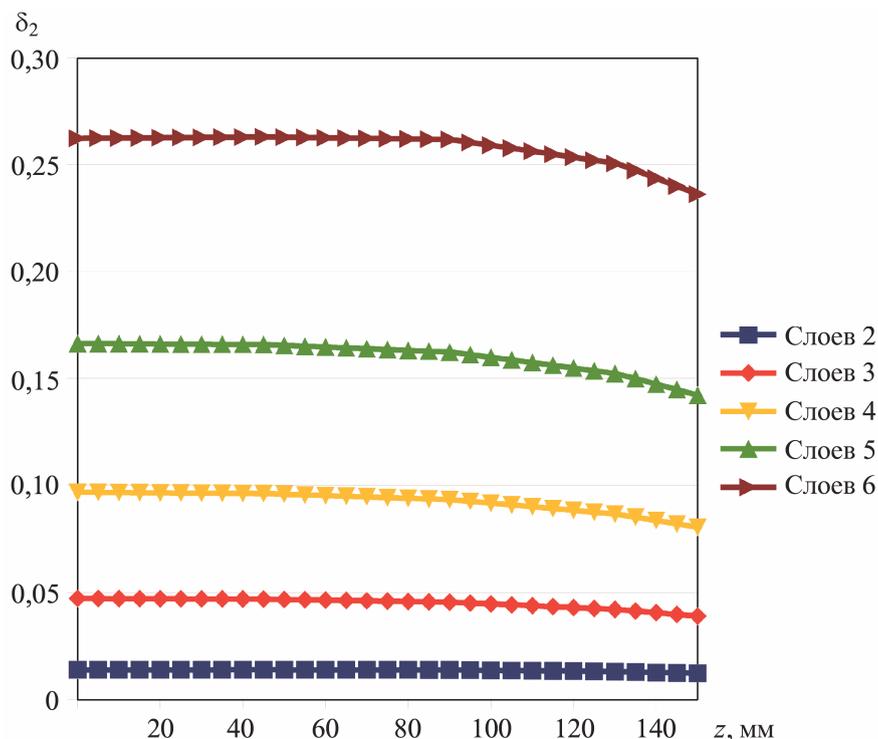
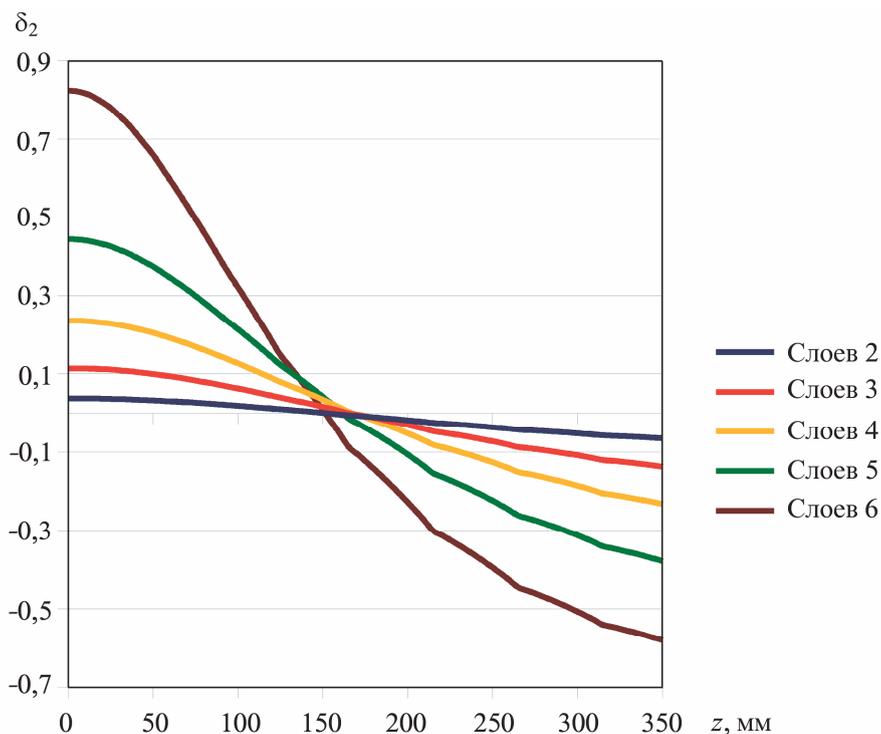


Рис. 9. Влияние положения измерительной катушки абсолютного ВТП с протяженной катушкой возбуждения на соотношение сигналов от ПС  $\delta_2$  во внешнем и центральном слоях ( $\mu_r = 2000$ )



**Рис. 10.** Влияние положения измерительной катушки абсолютного ВТП с узкой катушкой возбуждения на соотношение сигналов от ПС  $\delta_2$  во внешнем и центральном слоях ( $\mu_r = 2000$ )

Видно, что так же как и для дифференциального ВТП, для абсолютного ВТП существуют диапазоны положений измерительной катушки, в которых: сигнал от ПС во внешнем слое намного превышает сигнал от ПС в центральном слое; сигнал от ПС в центральном слое намного превышает сигнал от ПС во внешнем слое; сигналы от ПС во внешнем и центральном слоях имеют близкие значения.

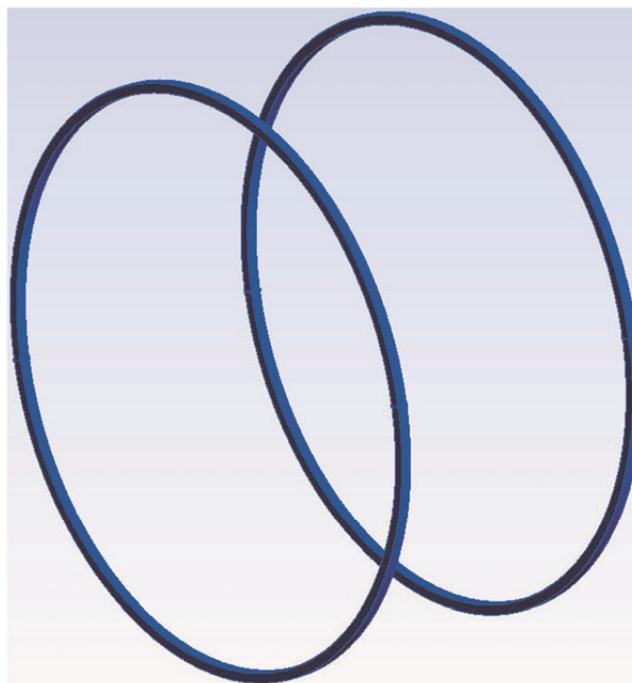
Аналогично дифференциальному ВТП использование датчика, имеющего несколько измерительных катушек, расположенных на разном расстоянии от центра возбуждающей катушки, позволяет повысить соотношение сигнал/помеха за счет разделения в радиальном направлении частей объекта, преимущественно формирующих сигналы и помехи в каждой из измерительных катушек.

Как частный случай измерительная катушка может быть расположена на расстоянии, обеспечивающем равную чувствительность к ПС во внешнем и внутренних слоях. При таком подходе может быть уменьшена дополнительная погрешность измерения ПС от изменения положения дефекта в сечении ванты.

**Сужение зоны контроля в азимутальном направлении**

Дополнительно сузить зону контроля объекта и, соответственно, повысить соотношение сигнал/помеха позволяет переход от дифференциально

включенных проходных измерительных катушек индуктивности (рис. 11) к совокупности накладных катушек индуктивности (рис. 12). Наводимая в каждой из накладных катушек ЭДС может анализироваться отдельно.



**Рис. 11.** Встречно включенные проходные измерительные катушки

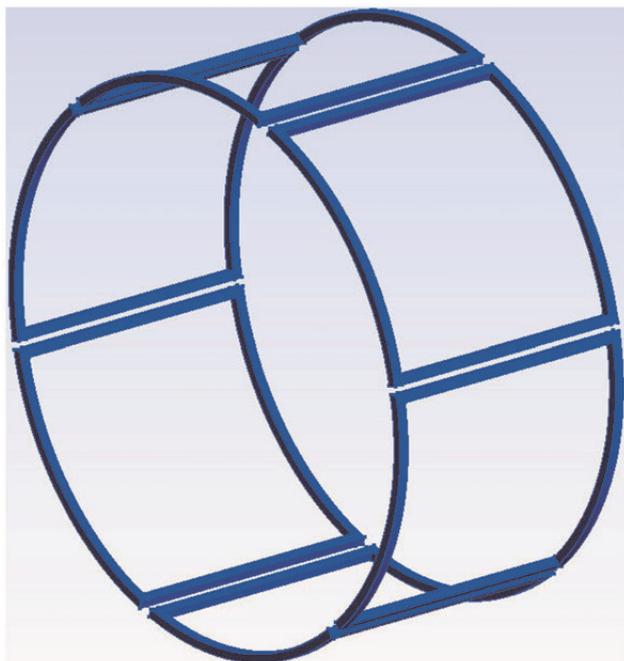


Рис. 12. Согласно включенные накладные измерительные катушки (6 катушек)

При согласном включении накладных катушек сумма ЭДС всех накладных катушек равна ЭДС, наводимой в дифференциально включенных проходных катушках. Это следует из того, что поток вектора магнитной индукции через замкнутую поверхность равен нулю в соответствии с законом Гаусса для магнитного поля  $\oint_s \vec{B} d\vec{S} = 0$ .

Например, рассмотрим цилиндр, основаниями которого являются встречно включенные проходные катушки индуктивности (см. рис. 11). Вся поверхность цилиндра может быть разбита на поверхности оснований цилиндра и боковую поверхность цилиндра. Так как поток вектора магнитной индукции через замкнутую поверхность равен нулю, то поток через боковую поверхность рассматриваемого цилиндра равен по модулю и противоположен по знаку суммарному потоку через основания цилиндра

$$\Phi_{\text{осн1}} + \Phi_{\text{осн2}} = -\Phi_{\text{бок}}$$

При выполнении интегрирования по замкнутой поверхности положительной считается внешняя нормаль, поэтому нормали к основаниям направлены в противоположные стороны. Величина наведенной в контуре ЭДС связана с потоком через контур согласно закону электромагнитной индукции Фарадея, причем положительное направление нормали связано с положительным направлением обхода контура правилом правого винта. Примем за положительное направление обхода контуров ка-

тушек такое направление, при котором положительное направление нормали совпадает с внешней нормалью к одному из оснований. В таком случае внешняя нормаль к другому основанию будет противоположной нормали, соответствующей положительному обходу контура. Таким образом, суммарная ЭДС, наводимая в двух одинаковых встречно включенных проходных измерительных катушках, содержащих по  $N$  витков каждая, будет равна

$$\begin{aligned} E_1 - E_2 &= -N \frac{\partial \Phi_{\text{осн1}}}{\partial t} + N \frac{\partial -\Phi_{\text{осн2}}}{\partial t} = \\ &= -N \frac{\partial (\Phi_{\text{осн1}} + \Phi_{\text{осн2}})}{\partial t} = N \frac{\partial (\Phi_{\text{бок}})}{\partial t} \end{aligned}$$

и равна ЭДС, наводимой во включенных согласно накладных катушках, охватывающих всю боковую поверхность и содержащих по  $N$  витков каждая, взятой с обратным знаком. Противоположный знак говорит лишь о том, что при обходе контура накладной катушки в направлении, соответствующем внешней нормали к боковой поверхности, лежащие на основании цилиндра участки катушки будут обходиться в направлении, соответствующем противоположному направлению внешней нормали к основанию цилиндра.

Таким образом, на сигналы отдельных накладных катушек могут быть распространены сделанные ранее выводы о зависимости соотношения сигналов внешнего и внутреннего дефектов от положения измерительных катушек, которое в данном случае соответствует протяженности накладной катушки в осевом направлении. Анализ сигналов отдельных накладных измерительных катушек, изображенных на рис. 12, позволяет дополнительно повысить соотношение сигнал/помеха за счет разделения в азимутальном направлении частей объекта, преимущественно формирующих сигналы и помехи в каждой из накладных измерительных катушек.

### Выводы

Использование узкой возбуждающей катушки, создающей неоднородное поле возбуждения, позволяет получить как преобразователи с преимущественной чувствительностью к дефектам во внешних слоях, так и преобразователи с преимущественной чувствительностью к дефектам во внутренних слоях и за счет этого повысить соотношение сигнал/помеха. В качестве частного случая может быть получен преобразователь, обеспечивающий близкую чувствительность к дефектам в различных слоях объекта.

Выполнение встречно включенных измерительных проходных катушек в виде совокупности согласно включенных накладных катушек и дополнительный анализ сигналов отдельных накладных катушек позволяет сузить зону контроля в азимутальном направлении и повысить соотношение сигнал/помеха.

Описанный подход может быть распространен на накладные датчики и нешихтованные объекты.

### Библиографический список

1. Семенов А. В., Слесарев Д. А. Неразрушающий контроль стрендовых канатов больших диаметров // Контроль. Диагностика. 2019. № 4. С. 20 – 27.
2. Пат. RU 2146362 С 1. Вихретоковый проходной преобразователь для дефектоскопии продольно-протяженных изделий / Ю. К. Федосенко, В. И. Гаврилов, В. Н. Лаврухин и др. Опубл. 10.03.2000, Бюл. № 7.
3. РД 03-348-00. Методические указания по магнитной дефектоскопии стальных канатов. Основные положения. М.: Госгортехнадзор России, 2000. 18 с.
4. Семенов А. В., Слесарев Д. А. Математическое моделирование вихретокового неразрушающего контроля стрендовых канатов // Контроль. Диагностика. 2021.

Т. 24, № 11. С. 4 – 11. DOI: 10.14489/td.2021.12.pp.004-011

5. Герасимов В. Г., Останин Ю. Я., Покровский А. Д. и др. Неразрушающий контроль качества изделий электромагнитными методами. М.: Энергия, 1978. 216 с.

### References

1. Semenov A. V., Slesarev D. A. (2019). Nondestructive testing of large diameter multistrand stay cables. *Kontrol'. Diagnostika*, (4), pp. 20 – 27. [in Russian language] DOI: 10.14489/td.2019.04.pp.020-027
2. Fedosenko Yu. K., Gavrilov V. I., Lavruhin V. N. et al. (2000). Eddy current transducer for flaw detection of longitudinally extended products. *Ru Patent No. RU 2146362 C 1*. [in Russian language]
3. Guidelines for magnetic flaw detection of steel ropes. Basic provisions. (2000). *Guidance document No. RD 03-348-00*. Moscow: Gosgortekhnadzor Rossii. [in Russian language]
4. Semenov A. V., Slesarev D. A. (2021). Mathematical modeling of eddy current non-destructive testing of strand ropes. *Kontrol'. Diagnostika*, Vol. 24, (11), pp. 4 – 11. [in Russian language] DOI: 10.14489/td.2021.12.pp.004-011
5. Gerasimov V. G., Ostanin Yu. Ya., Pokrovskiy A. D. et al. (1978). *Non-destructive quality control of products by electro-magnetic methods*. Moscow: Energiya. [in Russian language]

### Для цитирования статьи:

Семенов А. В. Повышение соотношения сигнал/помеха при вихретоковом контроле за счет создания неоднородного электромагнитного поля // Контроль. Диагностика. 2022. Т. 25, № 9. С. 4 – 13. DOI: 10.14489/td.2022.09.pp.004-013

Semenov A. V. (2022). Increasing the signal-to-noise ratio in eddy current NDT by creating of an inhomogeneous electromagnetic field. *Kontrol'. Diagnostika*, Vol. 25, (9), pp. 4 – 13. [in Russian language]. DOI: 10.14489/td.2022.09.pp.004-013