

УДК 620.179.147
DOI 10.14489/td.2021.12.pp.004-011

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВИХРЕТОКОВОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ СТРЕНДОВЫХ КАНАТОВ



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



Д. А. Слесарев,
д-р техн. наук,
ООО «ИНТРОН ПЛЮС»,
Москва, Россия.
E-mail: dslesarev@intron.ru

Изложены некоторые аспекты математического моделирования вихретокового метода неразрушающего контроля объектов, изготовленных в том числе из ферромагнитных материалов, позволяющие упростить математическую модель. Рассмотрено влияние движения неоднородного объекта контроля в неоднородном поле вихретокового преобразователя конечных размеров, а также влияние неоднородной намагниченности объекта, нелинейности и неоднозначности зависимости магнитной индукции от напряженности магнитного поля. Представлены примеры математической модели и результатов математического моделирования.

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

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

MATHEMATICAL MODELING OF MULTISTRAND STAY CABLES EDDY CURRENT NON-DESTRUCTIVE TESTING

Some aspects of mathematical simulation of the eddy current non-destructive testing for ferromagnetic components are considered that allow simplifying the mathematical model. The influence of the motion of an inhomogeneous test object in an inhomogeneous field of an eddy current probe of finite dimensions is considered. The influence of the inhomogeneous magnetization of the object, the nonlinearity and ambiguity of the dependence of the magnetic flux density on the magnetic field intensity is described. An example of a mathematical model and simulation results is presented.

Keywords: non-destructive testing, eddy current testing, multi-strand stay cables, parallel strand system, mathematical modeling.



Статья поступила в редакцию 13.09.2021

Received 13.09.2021

В последние десятилетия получили значительное распространение так называемые мультистрендовые канаты. Основной сферой применения мультистрендовых канатов являются ванты, т.е. неподвижные канаты, предназначенные для удержания различных конструкций. В частности, такие канаты нашли широкое применение в области строительства вантовых мостов. По мере старения использующих мультистрендовые канаты объектов задача неразрушающего контроля их состояния будет становиться все более актуальной. Одним из возможных методов неразрушающего контроля является вихретоковый, преимущество которого, как известно, заключается в его высокой производительности при невысоких затратах на проведение контроля. Реализующий вихретоковый метод контроля дефектоскоп обеспечивает приемлемый с точки зрения потери несущей способности порог

обнаружения дефектов, соответствующий обрыву одного стренда [1].

В процессе разработки вихретокового преобразователя необходимо иметь возможность изменять его параметры и получать сигналы преобразователя от предполагаемых дефектов сплошности материала *объекта контроля* (ОК). Изготовление макетов мультистрендовых канатов является трудоемкой и дорогостоящей задачей ввиду больших размеров и большого веса таких макетов. Изготовление макетов вихретоковых преобразователей, позволяющих изменять их параметры, также может быть достаточно трудоемкой задачей. Создание математической модели процесса вихретокового контроля позволяет сократить объем работ по макетированию.

Рассмотрим некоторые аспекты математического моделирования вихретокового метода неразрушающего контроля объектов, изготовленных

в том числе из ферромагнитных материалов, позволяющие упростить математическую модель. В качестве источника поля используется возбуждающая катушка индуктивности с протекающим в ней гармонически изменяющимся током. Приемниками сигнала являются измерительные катушки индуктивности. Объект движется относительно датчика. Используется слабое (по сравнению с полем необходимым для магнитного насыщения материала объекта контроля) электромагнитное поле.

Математическая модель вихретокового контроля

В общем случае электромагнитное поле для движущегося относительно источника поля мультистрендового каната описывается с помощью уравнений Максвелла [2, 3]:

1) теорема Гаусса – магнитное поле имеет замкнутые силовые линии

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0; \quad (1)$$

2) теорема о циркуляции магнитного поля

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{J}_{\text{полн}} = \sigma \vec{E} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \sigma [\vec{v}_{\text{ОК}} B]; \quad (2)$$

3) закон Гаусса для вектора электрического смещения

$$\operatorname{div} \vec{D} = \rho; \quad (3)$$

4) закон Фарадея

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}. \quad (4)$$

Помимо четырех основных уравнений используются так называемые материальные уравнения:

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \vec{E}; \quad (5)$$

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}); \quad (6)$$

$$\vec{J}_{\text{пр}} = \sigma \vec{E}, \quad (7)$$

где \vec{B} – вектор индукции магнитного поля; \vec{H} – вектор напряженности магнитного поля; $\vec{J}_{\text{полн}}$ – вектор полной плотности тока; σ – удельная электрическая проводимость (электропроводность); \vec{E} – вектор напряженности электрического поля; \vec{D} – вектор электрического смещения; $\vec{v}_{\text{ОК}}$ – скорость движения объекта контроля в первичном преобразователе; ρ – объемная плотность свободного электрического заряда; $\varepsilon_0 = \frac{1}{\mu_0 c^2} = 8,8541 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная; ε_r – относительная диэлектрическая проницаемость, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м –

магнитная постоянная; \vec{M} – намагниченность; $\vec{J}_{\text{пр}}$ – вектор плотности тока проводимости.

Напряженность электрического поля в свою очередь может быть разделена на напряженность электростатического поля и напряженность вихревого электрического поля, вызванного изменением магнитного поля во времени [4].

Уравнения записаны с учетом того, что в процессе вихретокового контроля мультистрендовых канатов не происходит переноса заряженных тел или частиц, в объекте отсутствуют сторонние силы неэлектромагнитного происхождения, в зоне контроля отсутствуют анизотропные материалы и материалы с нелинейной зависимостью поляризации от напряженности электрического поля.

Максимальная частота тока возбуждения ограничена требуемой глубиной проникновения и не превышает нескольких мегагерц. Таким образом, в области проводящего материала стрендов и катушек током смещения можно пренебречь, поскольку $\sigma \gg \varepsilon_0 \omega$. Стренды окружает воздух, диэлектрическая проницаемость которого близка к проницаемости вакуума. В связи с относительно низкой частотой тока возбуждения током смещения можно пренебречь и в окружающем объект контроля пространстве.

Степень влияния последнего члена уравнения (2) на решение для случаев с простой геометрией рассмотрена в работе [5]. Возможность пренебречь последним членом определяется прежде всего скоростью контроля. Скорость контроля стрендовых канатов, как правило, невысока, в связи с чем последний член уравнения (2) может быть опущен. Таким образом, исходная система уравнений приобретает следующий вид:

$$\frac{1}{\mu_0 \mu_r} \operatorname{rot} \vec{B} = \sigma \vec{E}; \quad (8)$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0; \quad (9)$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}; \quad (10)$$

$$\operatorname{div} \vec{D} = \rho. \quad (11)$$

Дополнительные влияющие факторы

В процессе контроля вихретоковый преобразователь конечных размеров перемещается относительно объекта контроля. В связи с этим при моделировании необходимо учитывать следующие факторы, осложняющие процесс создания численной модели:

- в процессе контроля неоднородный объект перемещается в зоне чувствительности преобразователя;

- в процессе контроля объект перемещается в неоднородном поле.

Дополнительно для объектов из ферромагнитных материалов также следует учитывать следующие факторы:

- объект из ферромагнитного материала может иметь неоднородную намагниченность и неоднородные магнитные свойства;

- ферромагнитный материал характеризуется нелинейной и неоднозначной зависимостью магнитной индукции от напряженности магнитного поля.

Таким образом, в общем случае необходимо решать систему уравнений, в которой зависимость между параметрами нелинейна и неоднозначна, а параметры задачи зависят от положения объекта в преобразователе, предыстории процесса контроля и начальных условий (например, фазы тока возбуждения).

Влияние движения неоднородного объекта

Тот факт, что объект перемещается в зоне чувствительности преобразователя, эквивалентен тому, что сигнал преобразователя модулируется влиянием неоднородности объекта. Для того чтобы в результате демодуляции можно было получить искаженный модулирующий сигнал в случае амплитудно-фазовой модуляции для малых значений индекса угловой модуляции, достаточно, чтобы частота модулирующего сигнала была меньше частоты модулируемого (несущего) сигнала [6], т.е. частоты поля возбуждения.

Максимальная частота модулирующего сигнала зависит от параметров объекта контроля, параметров дефекта, параметров преобразователя и скорости контроля. Порядок данной величины можно грубо оценить как величину, обратно пропорциональную времени прохождения точечной неоднородностью зоны чувствительности преобразователя.

Например, для случая возбуждающей катушки в виде бесконечно длинного соленоида и цилиндрического объекта контроля ширина спектра сигнала дифференциального преобразователя, вызванного коротким дефектом, составляет [7]

$$\omega_m \sim 10 \frac{v}{D}, \quad (12)$$

где v – скорость движения объекта относительно первичного преобразователя; D – диаметр измерительной катушки.

Следует отметить, что частота гармонически меняющегося тока возбуждения ограничена сверху необходимой глубиной проникновения. Таким образом, необходимо выполнение двух противоречивых требований – обеспечение достаточной глуби-

ны проникновения поля в объект и обеспечение приемлемой скорости, т.е. производительности контроля. Для рассматриваемых в данной работе мультистрендовых канатов электрический контакт между отдельными стрендами (при отсутствии повреждения внешней оболочки стрендов) отсутствует. Так как электрического контакта между отдельными стрендами нет, то поле проникает во внешнюю поверхность как наружных, так и внутренних стрендов вне зависимости от частоты поля возбуждения. Поскольку канат содержит большое число стрендов и стренды не связаны между собой, то с точки зрения обнаружения дефектов, существенно влияющих на несущую способность каната, достаточным можно считать обнаружение обрыва отдельного стренда. Если нет необходимости обнаруживать дефекты внутри проволок, то нет и необходимости понижать частоту тока возбуждения до величин, обеспечивающих глубину проникновения электромагнитного поля, сопоставимую с радиусом проволоки, из которой выполнены стренды. Ввиду этого частота тока возбуждения может быть выбрана достаточно большой для того, чтобы обеспечить возможность проведения контроля на любых скоростях, приемлемых с механической точки зрения.

Приведенные рассуждения справедливы для обнаружения локальных дефектов. Для обнаружения протяженных дефектов используют абсолютный преобразователь. Выражения, полученные для локального возмущения, необходимо скорректировать. Длительность сигнала в таком случае пропорциональна времени прохождения датчиком области протяженного дефекта (длиной зоны чувствительности датчика в данном случае можно пренебречь). В таком случае

$$t \sim 10 \frac{L_{\text{деф}}}{v}; f_{\text{max}} \sim \frac{1}{t} \sim \frac{v}{L_{\text{деф}}},$$

где $L_{\text{деф}}$ – длина дефекта.

Из данного выражения видно, что максимальная частота модулирующего сигнала f_{max} тем меньше, чем длиннее дефект. Исходя из полученного выражения очевидно, что частота тока возбуждения в несколько килогерц позволяет регистрировать дефекты требуемой протяженности на скоростях, намного больших, чем скорость контроля, приемлемая с механической точки зрения.

Таким образом, использование частоты тока возбуждения порядка нескольких килогерц позволяет восстановить модулирующий сигнал без искажений. Соответственно результат контроля не будет зависеть от скорости контроля и начальных условий, т.е. решение задачи движущегося объекта может быть заменено решением последовательности задач для разных положений условно неподвижного объекта.

Влияние свойств ферромагнитного материала

Стренды изготовлены из ферромагнитного материала, для которого зависимость индукции магнитного поля от напряженности магнитного поля имеет нелинейный и неоднозначный характер (одному значению напряженности магнитного поля могут соответствовать различные значения индукции магнитного поля в зависимости от предыстории магнитного состояния материала) [8].

С учетом того что предыстория магнитного состояния контролируемого материала неизвестна, в общем случае при осуществлении вихретокового контроля магнитное состояние материала меняется по неизвестному частному несимметричному циклу гистерезиса (рис. 1). При этом зависимость индукции от напряженности магнитного поля приближенно характеризуется средней проницаемостью на частном цикле μ_{cp} . Если потребовать, чтобы величина амплитуды возбуждающего поля была настолько мала, чтобы гистерезисом и нелинейностью частного цикла можно было пренебречь, то получим, что индукция магнитного поля связана с напряженностью магнитного поля линейной функцией

$$\vec{B}(t) = \vec{B}_{cp}(\vec{H}_{cp}) + \vec{B}_{\sim}(\vec{H}_{\sim}) = \mu_0 \mu_{cp} \vec{H}_{cp} + \mu_0 \mu_{cp} \vec{H}_{\sim}.$$

Так как зависимость упрощена до линейной, являющейся обратимой, то для напряженности магнитного поля можно записать

$$\vec{H}(t) = \vec{H}_{cp}(\vec{B}_{cp}) + \vec{H}_{\sim}(\vec{B}_{\sim}) = \frac{1}{\mu_0 \mu} \vec{B}_{cp} + \frac{1}{\mu_0 \mu_{cp}} \vec{B}_{\sim},$$

где \vec{B}_{cp} , \vec{H}_{cp} – постоянные во времени индукция и напряженность магнитного поля, характеризующие предысторию и источники намагничивания, не связанные с источником возбуждения с гармоническим током; \vec{H}_{\sim} , \vec{B}_{\sim} – напряженность и индукция магнитного поля, изменяющиеся по гармоническому закону с частотой тока возбуждения; μ – нормальная магнитная проницаемость; μ_{cp} – средняя на частном цикле магнитная проницаемость. При малом значении \vec{H}_{\sim} средняя на частном цикле магнитная проницаемость может быть приближенно

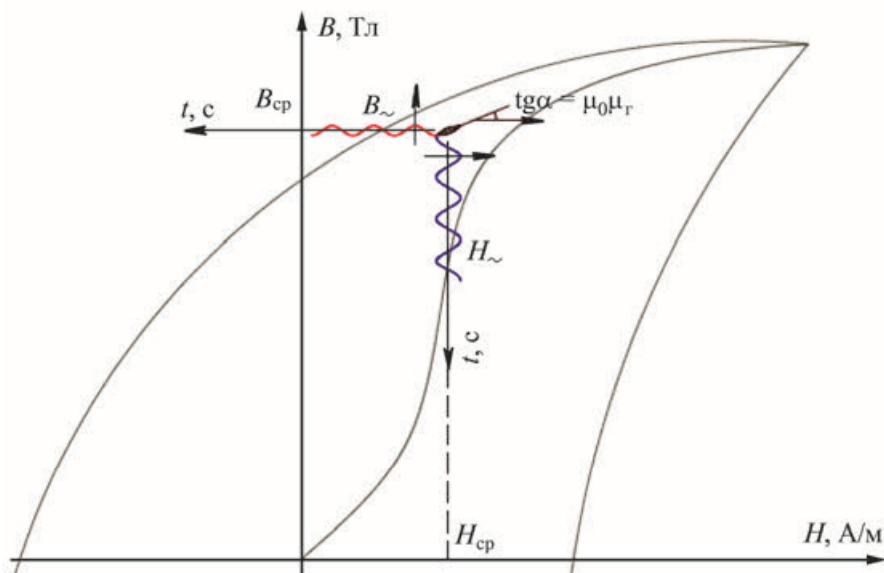


Рис. 1. Зависимость индукции магнитного поля от напряженности магнитного поля в случае возбуждения синусоидального поля малой амплитуды на фоне постоянного поля

заменена обратимой проницаемостью μ_r , которая в большинстве случаев зависит от намагниченности образца и не зависит от его магнитной предыстории, а также изменяется в значительно меньших пределах по сравнению с дифференциальной магнитной проницаемостью или нормальной магнитной проницаемостью [8].

Так как обратимая проницаемость определяется прежде всего намагниченностью материала, то μ_r в общем случае имеет разные значения в различных точках контролируемого изделия и должна быть функцией координаты. Однако поскольку намагниченность в каждой точке образца является в общем случае случайной величиной и априорно неизвестна, то в рамках математической модели необходимо принять допущение, что μ_r не зависит от координаты и равна некоторому усредненному значению.

Следует отметить, что ослабление поля приводит к уменьшению наводимой в измерительных катушках ЭДС. Допустимая величина наводимой на измерительных катушках ЭДС ограничена снизу, в том числе характеристиками измерительного тракта дефектоскопа. Однако обычно требование малости возбуждающего поля не является критическим с точки зрения вихретокового контроля. Помимо величины поля и скорости его изменения величина ЭДС определяется еще и числом витков в измерительных катушках. Таким образом, ЭДС может быть увеличена до допустимого уровня за счет увеличения числа витков в измерительных катушках.

Влияние движения объекта в неоднородном поле

В процессе выполнения контроля каждая точка объекта контроля, перемещаясь вдоль возбуждающей катушки конечных размеров, перемещается из области, где полем возбуждения можно пренебречь (на бесконечном удалении от возбуждающей катушки), в область, где поле возбуждения максимально (центр возбуждающей катушки), и далее вновь в область, где наличием поля можно пренебречь. Таким образом, магнитная индукция и напряженность электрического поля в каждой точке объекта контроля связаны не только с изменением возбуждающего поля во времени, но и с изменением положения точки объекта в неоднородном электромагнитном поле.

Производная меняющейся по гармоническому закону величины пропорциональна частоте, соответственно, составляющая напряженности электрического поля, определяемая изменением поля возбуждения во времени, будет пропорциональна частоте:

$$\max \left| \frac{\partial B}{\partial t} \right|_1 \approx B_{\max} \omega.$$

Для получения грубой оценки (не учитывающей влияние самого ОК) скорости изменения поля, обусловленного движением ОК в неоднородном поле источника, в качестве примера неоднородного поля рассмотрим поле узкого витка с током. Поле витка с током радиусом R на оси витка на расстоянии x от центра витка определяется выражением [4]

$$B = \frac{\mu_a I}{2} \frac{R^2}{(R^2 + x^2)^{3/2}}.$$

Максимальное значение производная принимает в точке $R/2$, и оно составляет примерно $\max \left| \frac{\partial B}{\partial t} \right|_1 \approx B_{\max} \frac{1}{R}$, соответственно, составляющая производной по времени, определяемая движением, будет равна $\max \left| \frac{\partial B}{\partial t} \right|_2 = \max \left| \frac{\partial B}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} \right| \approx B_{\max} \frac{1}{R} v$.

В случае когда $\frac{1}{R} v \ll \omega$, составляющей, вызванной движением ОК относительно источника поля, очевидно, можно пренебречь. Для радиуса витка может быть записана следующая оценка: $R \gg \frac{v}{\omega}$, для час-

тоты возбуждающего поля: $f \gg \frac{v}{2\pi R}$. Так, для скорости 1 м/с и диаметра витка 0,3 м получим, что пренебречь вкладом от движения объекта в неоднородном поле можно при частоте тока возбуждения значительно больше 0,5 Гц. Поле более протяжен-

ной катушки возбуждения будет более однородным, соответственно, вклад от движения в неоднородном поле будет еще меньше. Таким образом, для частоты тока возбуждения порядка нескольких килогерц вкладом от движения объекта в неоднородном поле можно пренебречь, что в свою очередь позволяет рассматривать модель условно неподвижного объекта контроля.

С учетом всех сделанных допущений можно считать, что в каждой точке объекта характеризующие переменное электромагнитное поле величины $\vec{B}_\sim, \vec{H}_\sim, \vec{E}_\sim, \vec{D}_\sim$ являются гармоническими функциями времени для каждого положения условно неподвижного объекта. С учетом линейности дифференциальных операторов ротора и дивергенции и линейности операции дифференцирования по времени получим:

$$\begin{aligned} \frac{-1}{\mu_0 \mu_r} \operatorname{rot} \vec{B}_{\text{cp}} + \frac{1}{\mu_0 \mu_r} \operatorname{rot} \vec{B}_\sim &= \sigma \vec{E}_\sim; \\ \operatorname{div} \vec{B}_{\text{cp}} + \operatorname{div} \vec{B}_\sim &= 0; \end{aligned} \tag{14}$$

$$\operatorname{rot} \vec{E}_\sim = -\frac{\partial \vec{B}_{\text{cp}}}{\partial t} - \frac{\partial \vec{B}_\sim}{\partial t};$$

$$\operatorname{div} \vec{D} = \rho.$$

Для условно неподвижного объекта контроля получим, что часть составляющих в уравнении зависит от времени по гармоническому закону, а часть составляющих уравнения не зависит от времени. Так как равенство выполняется в любой момент времени, то можем рассматривать отдельно уравнение для зависящих от времени (гармонических) составляющих и для составляющих, не зависящих от времени.

Для гармонически изменяющихся составляющих получим:

$$\frac{1}{\mu_0 \mu_r} \operatorname{rot} \vec{B}_\sim = \sigma \vec{E}_\sim; \tag{15}$$

$$\operatorname{div} \vec{B}_\sim = 0; \tag{16}$$

$$\operatorname{rot} \vec{E}_\sim = -\frac{\partial \vec{B}_\sim}{\partial t} \tag{17}$$

$$\operatorname{div} \vec{D}_\sim = \rho_\sim. \tag{18}$$

Влияние неоднородной намагнитченности каната

Неизменные во времени составляющие уравнения связаны, например, с намагнитченностью объекта контроля под действием вибраций в магнитном

поле земли [8] или какими-либо магнитными пятнами, полученными в процессе производства элементов конструкций, строительства объекта, или с неоднородностью объекта. При движении датчика по объекту контроля данные составляющие также будут приводить к возникновению электродвижущей силы в измерительной катушке. Поэтому в общем случае для движущегося вдоль ОК датчика рассматривать только гармонические составляющие нельзя.

Рассмотрим спектр ЭДС, наводимой на измерительной катушке движущегося первичного преобразователя, вызванной вихревыми токами и постоянным во времени магнитным полем.

Как было отмечено выше, при воздействии объекта контроля в процессе его движения относительно первичного преобразователя на напряжения, наводимые в измерительных катушках эквивалентно амплитудно-фазовой модуляции, ширина спектра модулированного сигнала равна удвоенной ширине спектра модулирующего сигнала, а ширина спектра модулирующего сигнала определяется скоростью движения первичного преобразователя относительно ОК, параметрами первичного преобразователя и параметрами неоднородности объекта.

В то же время в катушке наводится ЭДС, вызванная изменением постоянного во времени магнитного поля вдоль объекта контроля (из-за разной намагниченности различных участков объекта, изменения геометрических размеров ОК и т.д.). ЭДС равна скорости изменения потокосцепления, которая соответственно определяется скоростью движения ОК, распределением поля вдоль ОК и параметрами первичного преобразователя.

Схематически спектр наводимой в измерительных катушках ЭДС показан на рис. 2. Ширина обеих частей спектра уменьшается пропорционально снижению скорости контроля.

Таким образом, благодаря повышению частоты возбуждающего поля, уменьшению скорости движения и изменению параметров преобразователя можно добиться разнесения частей спектра, вызванных переменным возбуждающим полем и неоднородностью постоянного во времени поля вдоль объекта. Извлечение полезной информации из напряжения на катушках первичного преобразователя осуществляется путем демодуляции модулированного объектом контроля сигнала. В связи с тем что частота несущей задается источником возбуждения, демодуляция может без труда осуществляться фазочувствительным синхронным детектором [6]. В результате часть спектра, обусловленная неизменным во времени магнитным полем, сдвигается на частоту тока возбуждения. Верхняя граница полосы пропускания измерительного тракта выбирается достаточно высокой, чтобы обеспечить про-

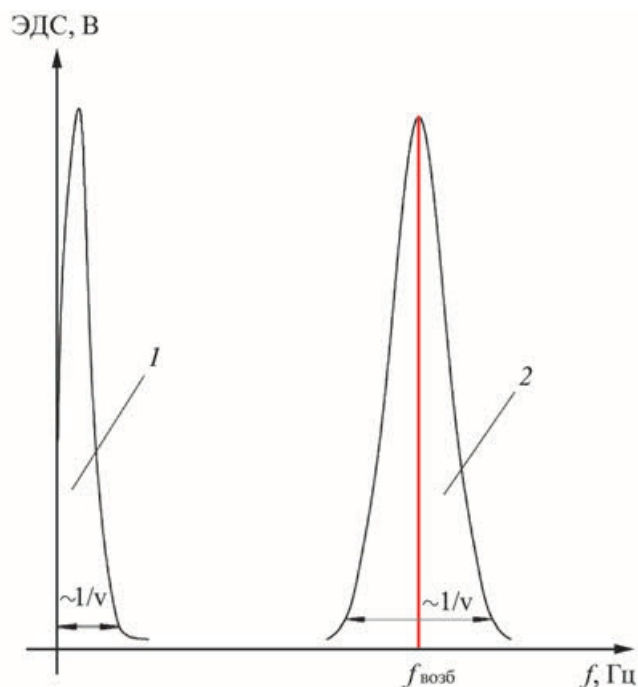


Рис. 2. Спектр ЭДС, наведенной на измерительной катушке:

1 – часть спектра, обусловленная собственной намагниченностью ОК; 2 – часть спектра, обусловленная полем источника возбуждения

пускание части спектра, соответствующей модулирующему сигналу, и в то же время достаточно низкой для того, чтобы эффективно подавить часть спектра, наведенного неизменными во времени составляющими. В результате неизменные во времени составляющие могут быть подавлены и при моделировании могут не учитываться.

Упрощенная математическая модель

Итак, с учетом сделанных допущений моделирование может проводиться только для изменяющихся по гармоническому закону составляющих для разных положений условно неподвижного объекта. Формально зависимость от времени может быть исключена с помощью перехода к комплексным изображениям гармонических величин. Производная по времени в данном случае сводится к умножению на $i\omega$, где i – мнимая единица. Получим следующие уравнения:

$$\frac{1}{\mu_0 \mu_r} \operatorname{rot} \vec{B}_\sim = \sigma \vec{E}_\sim; \quad (19)$$

$$\operatorname{div} \vec{B}_\sim = 0; \quad (20)$$

$$\operatorname{rot} \vec{E}_\sim = -i\omega \vec{B}_\sim; \quad (21)$$

$$\operatorname{div} \vec{D}_\sim = \rho_\sim. \quad (22)$$

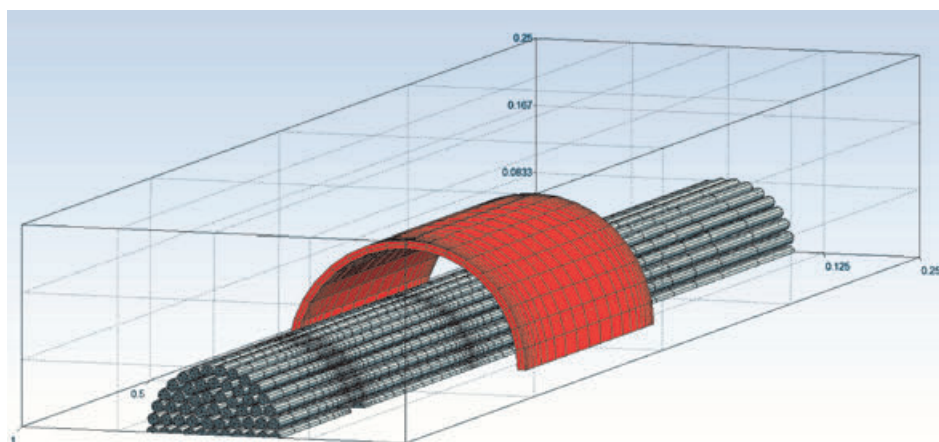


Рис. 3. Модель ванты и ВТП с возбуждающей катушкой в виде соленоида

Так как зависимость от времени исключена, то начальные значения при таком подходе задавать нет необходимости.

Результаты моделирования

Система уравнений, как правило, решается численными методами ввиду сложности геометрических параметров реальных объектов. С учетом сделанных допущений была создана математическая модель вихретокового неразрушающего контроля стрендовых канатов. В качестве примера на рис. 3 показана математическая модель

вихретокового контроля *вихретоковым преобразователем* (ВТП) на основе протяженной катушки возбуждения. Область моделирования уменьшена вдвое из-за наличия плоскости симметрии, проходящей через ось центрального стренда и ось стренда, содержащего дефект (для дефекта в центральном слое – через ось центрального стренда и ось любого другого стренда). Путем решения последовательности задач, соответствующих разному взаимному расположению дефекта и катушки возбуждения, может быть получен годограф, соответствующий перемещению дефекта вдоль каната.

На рис. 4 приведены значения $\Delta \dot{U}_{вн}^*$, получаемые от локального дефекта (обрыв одной пряди с расстоянием между концами 50 мм) дифференциальным датчиком с расстоянием между измерительными катушками 100 мм, для модели каната, состоящего из 91 стренда. Длина возбуждающей катушки равна 500 мм, диаметр 300 мм. Годографы соответствуют перемещению дефекта от центра дифференциального датчика в бесконечность.

Выводы

Таким образом, выбор частоты тока возбуждения, величины возбуждающего поля, скорости контроля и параметров преобразователя позволяет значительно упростить математическую модель вихретокового неразрушающего контроля движущегося объекта, изготовленного в том числе из ферромагнитного материала. Частота тока возбуждения должна быть достаточно высокой, а скорость контроля

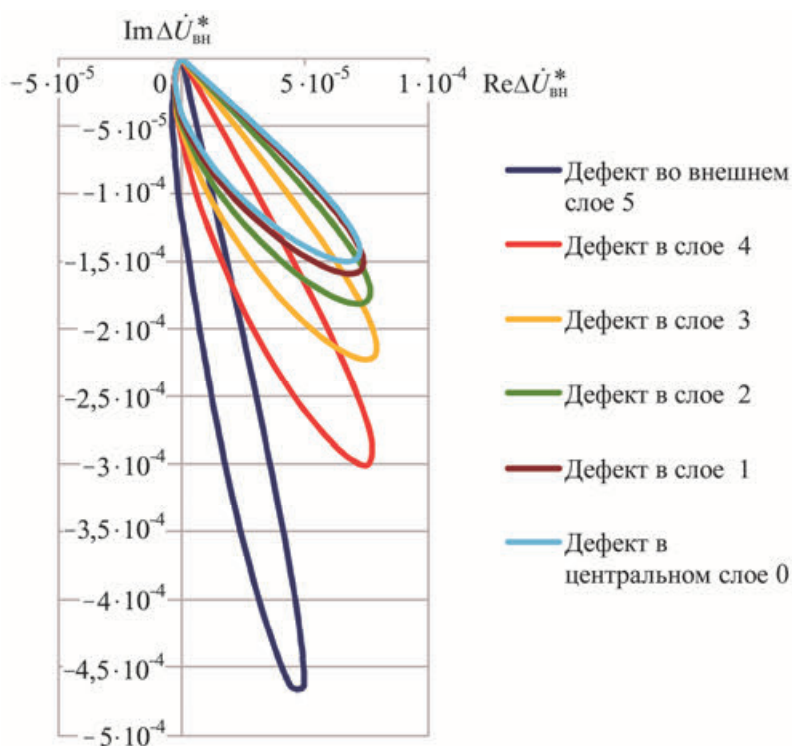


Рис. 4. Относительное вносимое напряжение, наводимое на измерительной катушке при перемещении преобразователя вдоль ванты с локальным дефектом

достаточно низкой, чтобы можно было пренебречь вкладом движения объекта и восстановить без искажений модулирующий сигнал. Величина возбуждающего поля должна быть достаточно малой для того, чтобы можно было пренебречь нелинейностью частного цикла гистерезиса.

Библиографический список

1. Семенов А. В., Слесарев Д. А. Неразрушающий контроль стрендовых канатов больших диаметров // Контроль. Диагностика. 2019. № 4. С. 20 – 27.
2. Kuczmann M. Potential formulations in magnetics applying the finite element method: Lecture notes / Laboratory of Electromagnetic Fields; Széchenyi István University. Gyor, 2009.
3. **Неразрушающий контроль:** в 5 кн. Кн. 3. Электромагнитный контроль: практ. пособие / В. Г. Герасимов, А. Д. Покровский, В. В. Сухоруков; под ред. В. В. Сухорукова. М.: Высш. шк., 1992.
4. Савельев И. В. Курс общей физики: учеб. пособие: в 4 т. Т. 2. Электричество и магнетизм. Волны. М.: КНОРУС, 2009. 368 с.
5. **Неразрушающий контроль:** справочник: в 8 т. / под общ. ред. В. В. Клюева. Т. 2: в 2 кн. Кн. 2. Вихретоковый контроль / Ю. К. Федосенко, В. Г. Герасимов, А. Д. Покровский, Ю. Я. Останин. 2-е изд., испр. М.: Машиностроение, 2006. 688 с.
6. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов. СПб.: Питер, 2002. 608 с.
7. Сухоруков В. В., Улитин Ю. М., Чернов Л. А. Возможность определения параметров дефектов при модуляционной вихретоковой дефектоскопии // Дефектоскопия. 1977. № 1. С. 7 – 14.

Для цитирования статьи:

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

Semenov A. V., Slesarev D. A. (2021). Mathematical modeling of multistrand stay cables eddy current non-destructive testing. *Kontrol'. Diagnostika, Vol. 24, (11)*, pp. 4 – 11. [in Russian language]. DOI 10.14489/td.2021.12.pp.004-011

8. Кифер И. И. Испытание ферромагнитных материалов. М.: Энергия, 1969. 544 с.

References

1. Semenov A. V., Slesarev D. A. (2019). Non-destructive testing of large diameter strand ropes. *Kontrol'. Diagnostika, (4)*, pp. 20 – 27. [in Russian language] DOI: 10.14489/td.2019.04.pp.020-027
2. Kuczmann M. (2009). *Potential formulations in magnetics applying the finite element method: Lecture notes. Laboratory of Electromagnetic Fields.* Gyor: Széchenyi István University.
3. Suhorukov V. V. (Ed.), Gerasimov V. G., Pokrovskiy A. D. (1992). *Non-destructive testing: in 5 books. Book 3. Electromagnetic testing: a practical guide.* Moscow: Vysshaya shkola. [in Russian language]
4. Savel'ev I. V. (2009). *General physics course: textbook. allowance: in 4 volumes. Vol. 2. Electricity and magnetism. Waves.* Moscow: KNORUS. [in Russian language]
5. Klyuev V. V. (Ed.), Fedosenko Yu. K., Gerasimov V. G., Pokrovskiy A. D., Ostanin Yu. Ya. (2006). *Non-destructive testing: reference book: in 8 volumes. Vol. 2: in 2 books. Book 2. Eddy current testing. 2nd ed.* Moscow: Mashinostroenie. [in Russian language]
6. Sergienko A. B. (2002). *Digital signal processing.* Saint Petersburg: Piter. [in Russian language]
7. Suhorukov V. V., Ulitin Yu. M., Chernov L. A. (1977). Possibility of determining the parameters of defects in modulation eddy current flaw detection. *Defektoskopiya, (1)*, pp. 7 – 14. [in Russian language]
8. Kifer I. I. (1969). *Testing of ferromagnetic materials.* Moscow: Energiya. [in Russian language]