

3. Розенгарт Т.К. Техничко-экономическое обоснование выбора проектных решений систем водоотведения и канализации/ Методические указания, СПб. – 1992.
4. Кичигин В.И. Выбор систем водоотведения в условиях неопределенности // Инженерная защита окружающей среды: Материалы докладов Международной конференции. – М.: МГУИЭ, 2000. – С. 5–16.
5. Усольцев В.П., Юран С.И. Достоверность санитарно-эпидемиологического анализа сточных вод при большом количестве случайных воздействий и отсутствии доминирующего фактора // Теоретическая и прикладная экология. – 2016. – № 3. – С. 19–24.
6. Алексеев В.А. Классификатор пульсовых кривых с использованием матриц отношения / В.А. Алексеев, К.И. Дизендорф, С.И. Юран // Интеллектуальные системы в производстве. – 2010. – № 1(15) – Ижевск : Изд-во ИжГТУ. – С. 231–235.
7. Жавнер В.Л. Мехатронные принципы проектирования технологического оборудования / В.Л. Жав-

- нер, А.Б. Смирнов // Конструктор-машиностроитель. – 2008. – № 3. – С. 12–15.
8. Смирнов А.Б. Элементная база автоматических машин. Мехатронные модули микроперемещений технологических машин: учеб. пособие / А.Б. Смирнов. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. – 172 с.
9. Алексеев В.А., Усольцев В.П., Юран С.И., Шульмин Д.Н. Комплекс контроля изменений оптической плотности сточных вод // Приборы и методы измерений. – 2018. – Том 9, № 1. – С 7–16. DOI: 10.21122/2220-9506
10. Патент РФ №153362 на полезную модель МПК G01N15/06. Устройство устранения аварийного выброса / Алексеев В.А., Девятов Н.А., Юран С.И., Усольцев В.П. – Оpubл. 20.07.2015.
11. Александровская Л.Н. Риск-ориентированный контроль содержания в воде загрязняющих веществ / Л.Н. Александровская, О.М. Розенталь // Аналитика и контроль. – 2016. – Т. 20, № 1. – С. 6–14.

УДК 620.179.17

ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ МЕАНДРОВОГО ВИХРЕТОКОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ К МЕХАНИЧЕСКИМ НАПРЯЖЕНИЯМ ПРИ ИЗГИБЕ В ФЕРРОМАГНЕТИКЕ

Бусько В.Н., Венгринович В.Л., Кмита К.Ю.

Государственное научное учреждение «Институт прикладной физики НАН Беларуси»
Минск, Республика Беларусь

Вихретоковый метод относится к одним из наиболее распространенных и эффективных физических методов неразрушающего контроля (НК), дефектоскопии и исследования электропроводящих материалов, изделий, деталей и конструкций. Он основан на анализе взаимодействия электромагнитного поля внешнего источника с электромагнитным полем вихревых токов (ВТ), возбуждаемых в объекте контроля переменным магнитным полем. Возбуждение и регистрация ВТ в материале производятся с помощью вихретокового преобразователя (ВП), от технических характеристик и конструкции которого зависят эффективность и достоверность получаемых результатов.

В последнее время при использовании вихретокового метода все большее распространение получают меандровые вихретоковые преобразователи (МВП) накладного типа на гибкой или негибкой основе. Такие МВП на Западе получили широкое распространение для решения различных задач НК и дефектоскопии поверхностных и нанесенных слоев в проводящих материалах [1–2], однако, в РБ еще не получили широкого распространения. В связи с этим целью работы является конструирование, испытание и исследование возможности применения МВП, в частности, для оценки механических напряжений в ферромагнитных материалах.

При испытании и оценке чувствительности МВП к механическим напряжениям (с учетом их знака) использовались различные типы и конструкции изготовленных в ИПФ НАН Беларуси

датчиков, отличающихся между собой габаритами, толщиной и видом основания, сечениями обмоток катушек возбуждения и регистрации, схемами их подключения, компоновкой и количеством одинарных МВП в матричном преобразователе, а также индуктивностью, реактивным и активным сопротивлениями [3–5].

Для исследования оценки чувствительности МВП к величине и знаку приложенных напряжений использована представленная на рис. 1 схема формирования в образце механических напряжений и место установки датчика.

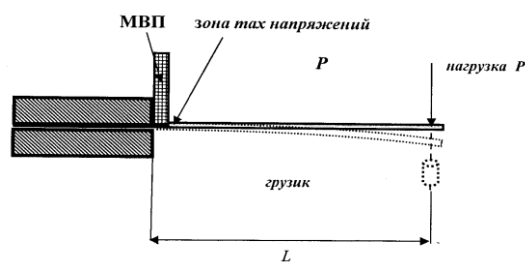


Рисунок 1 – Схема исследования и оценки чувствительности МВП к механическим напряжениям в ферромагнитном образце

В качестве МВП использовался экспериментальный макет плоского одинарного меандрового датчика с размещенными внизу корпуса карандашного типа круглого сечения $S \approx 0,8 \text{ см}^2$ двумя катушками – возбуждения и регистрации вихретокового сигнала, представляющего собой накладной преобразователь трансформаторного типа. При этом обе катушки МВП находились в одной плоскости. Для расширения функцио-

нальных возможностей метода и повышения эффективности МВП был специальным образом адаптирован к вихретоковому дефектоскопу типа «Вектор» производства РФ, предназначенному для дефектоскопии, контроля и исследования качества изделий из электропроводящих материалов (рис. 2).



Рисунок 2 – Фотография внешнего вида вихретокового дефектоскопа «Вектор» в комплекте с экспериментальным образцом исследуемого меандрового вихретокового преобразователя

При подключении МВП к вихретоковому дефектоскопу использовалась специальная схема согласования с входом прибора. Для использования всех приборных функций и возможностей МВП обе его катушки соединялись последовательно, в итоге он стал параметрическим, что упростило управление прибором и улучшило частотную характеристику преобразователя. Основные характеристики (индуктивность L , активное сопротивление R , габариты) МВП приведены в таблице.

Таблица – Основные характеристики используемого одинарного меандрового вихретокового преобразователя

S , мм ²	$R_{ов}$, Ом	$R_{ор}$, Ом	$L_{ов}$, мГн	$L_{ор}$, мГн
78,5	2,5	31,5	36	61

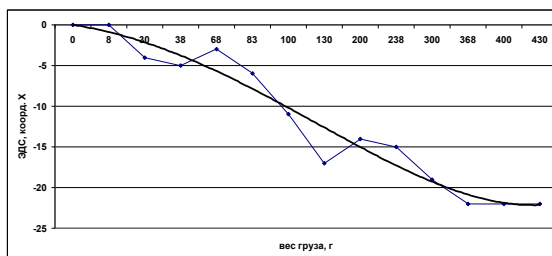
Примечание: ов – обмотка возбуждения, ор – обмотка регистрации

Исследовались образцы из различных ферромагнитных материалов, одним из них был образец из стали Ст.3 в форме прямоугольной пластины размером 130×22×2 мм.

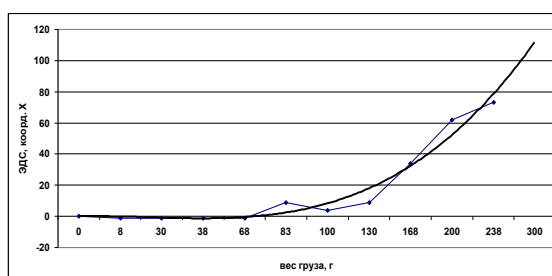
Несущая частота генерации обмотки возбуждения МВП составляла 1,03 МГц. Уровень мощности генератора возбуждения составлял 70 % от максимальной. Так как сигнал МВП представлял собой комплексную величину, состоящую из вносимого активного и индуктивного сопротивлений, то информативными параметрами являлись амплитуда вихретокового сигнала, фаза, сдвиг его по координатам X и Y, а также вихретоковый годограф – векторное изображение (или направление вектора) изменения сигнала под влиянием каждого переменного значения на комплексной плоскости.

На рис. 3 представлены полученные экспериментальным путем зависимости изменения параметра вихретокового сигнала (ЭДС) по координате X от веса грузиков, с помощью которых в образце формировались механические напряжения. Смещение по координате Y и угол поворота фазы

φ также изменялись, но более сложным образом и незначительно. Видно, что с увеличением веса грузов (уровня напряжений) МВП регистрирует изменение вихретокового сигнала практически во всем диапазоне изменения напряжений, что свидетельствует о наличии чувствительности датчика к приложенным напряжениям в образце.



а



б

Рисунок 3 – Зависимость сигнала (координаты X) одинарного меандрового вихретокового преобразователя от веса грузиков при: а – растяжении; б – сжатии: точки – эксперимент, линия – аппроксимация (полином)

Изменение уровня растягивающих (σ_p) и сжимающих (σ_c) напряжений приводит к изменению ЭДС вихретокового сигнала, при этом чувствительность к σ_c выше, чем к σ_p . Чувствительность МВП к напряжениям растяжения наблюдается в диапазоне изменения веса грузиков примерно от 68 г до 238 г – при сжатии и от 8 г до 430 г – при растяжении, что соответствует формируемым в образце значениям σ_c в диапазоне от 26 до 86 МПа и $\sigma_p \approx$ от -3 до \approx -150 МПа. Видно, что чувствительность МВП к напряжениям сжатия превосходит чувствительность к напряжениям растяжения, однако диапазон ее изменения значительно уже.

На рис. 4 в качестве иллюстрации представлены примеры годографов МВП, полученные с помощью фотосъемки с экрана вихретокового дефектоскопа «Вектор» с одновременным отображением текущих значений координат X, Y для двух значений веса грузиков с напряжением растяжения σ_p при изгибе в образце стали Ст. 3 с более низким коэффициентом усиления сигнала в приборе. Видно, что меняется также и комплексная величина, ответственная за индуктивную составляющую вихретокового сигнала.

Анализируя годограф, можно оптимизировать параметры и конструкции МВП, обеспечивающие максимальную чувствительность к механическим напряжениям.



а

б

Рисунок 4 – Пример изображения (фото) годографов МВП с экрана дефектоскопа:

а – образец без нагружения; б – с грузом 300 г

Таким образом, выполненный эксперимент показал, что плоский одинарный меандровый вихретоковый преобразователь в комплекте с серийно выпускаемым вихретоковым дефектоскопом имеет высокую чувствительность к механическим напряжениям растяжения и сжатия при изгибе. Полученные результаты могут быть использованы при конструировании и изготовлении одинарных и матричных МВП для исследований,

оценки и контроля критического уровня механических напряжений, как в образцах, так и в конструкциях, изготовленных из различных ферромагнитных материалов.

Литература

1. Goldfine N., Zilberstein V., Cardill S., Schlicker D. MVM-Arrau Eddi Current Sensors for Detection of Cracks in Regions with Fretting Damage // ASNT Matherials Evaluation, V.60, №7. – 2002.
2. Неразрушающий контроль: справочник: в 7 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 2.- М.: Машиностроение, 2003. – 688 с.
3. Венгринович В.Л., Ануфриева Г.Н. Технология получения гибких датчиков для вихретокового контроля // матер. межд. НТК «Приборостроение-2012», 21-23.10.2012. – С. 29–30.
4. Бусько В.Н., Венгринович В.Л. Повышение уровня сигнала матричного меандрового вихретокового преобразователя / Матер. межд. НТК «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии», 27-28.04.2018, Могилев, ГУ ВПО «Белорусско-российский университет», 2018. – С. 346–347.
5. Бусько В.Н., Венгринович В.Л., Кмита К.Ю. Испытания и исследования меандровых вихретоковых преобразователей // Матер. 11-й межд. НТК «Приборостроение-2018», 14-16.11.2018, Минск, БНТУ, 2018. – С. 10–11.

УДК 621.317.328:621.372.8

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ ЦЕЛЕВЫХ ВОЛНОВОДОВ С ЗАПОЛНЕНИЕМ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИМ ПОЛИМЕРОМ

Гончаренко И.А., Рябцев В.Н.

Университет гражданской защиты МЧС Республики Беларусь
Минск, Республика Беларусь

Измерения электромагнитных полей играют значительную роль в различных областях науки и техники. При этом значительными преимуществами обладают оптические датчики электрического поля благодаря малым размерам, меньшему весу, более высокой чувствительности, широкому спектральному диапазону, защищенностью канала передачи данных от воздействия помех [1]. Ранее нами была рассмотрена схема оптического датчика электрического поля с использованием жидких кристаллов [2]. Такие датчики позволяют измерять переменные электрические поля с частотой лишь до десятков кГц. Однако в ряде случаев, например, при детектировании СВЧ волн высокой мощности, электромагнитных импульсов, анализе внешних электромагнитных помех, проверке электромагнитной совместимости и т.д., возникает необходимость измерения параметров электрических полей с частотой более 1 МГц.

В данной работе рассматривается структура и принцип работы оптического датчика высокочастотных электромагнитных полей на основе микрокольцевых резонаторов на базе оптических

волноводов с горизонтальной и вертикальной щелью, заполненной электрооптическим полимером (ЭОП).

Кольцевой микрорезонатор имеет набор резонансных длин волн. Излучение, распространяющееся по входному волноводу на длинах волн, совпадающих с резонансными, поступает в кольцевой волновод. Оставшаяся часть излучения на других длинах волн распространяется дальше, практически не отходя в микрорезонатор. Ответвленное в кольцевой волновод излучение переходит из него в выходной волновод. Таким образом, в выходной волновод поступает излучение узких спектральных диапазонов, центральные длины волн которых соответствуют резонансным длинам волн микрорезонатора. Ширина этих диапазонов задается коэффициентом связи кольцевого и прямых волноводов, а также параметрами самого микрорезонатора.

Если щелевой волновод с ЭОП заполнением внести во внешнее электрическое поле, показатель преломления ЭОП изменится пропорционально величине электрического поля. Это в свою