

УДК 620.179

Исследование сигналов матричного вихретокового преобразователя

Ю.В. Мантрова, А.Д. Покровский

Мантрова Юлия Викторовна — магистр НИУ «МЭИ», e-mail: mantrovayv@gmail.com**Покровский Алексей Дмитриевич** — доктор технических наук, профессор кафедры электротехники и интроскопии НИУ «МЭИ», e-mail: pokrovskyad@mpei.ru

Приведен анализ сигнала матричного вихретокового преобразователя. Представлены рекомендации по геометрическим параметрам и зазору между преобразователем и поверхностью объекта контроля. Показано влияние электрической проводимости и магнитной проницаемости, а также возможность оценить каждую из них по отдельности. Показано, что эффект от коррозии эквивалентен суммарному воздействию магнитных и электрических параметров объекта

Для выбора параметров преобразователя исследовано влияние расстояния между катушками на сигнал, наводимый катушкой возбуждения на соседнюю катушку. Ток возбуждения может включаться в каждую из катушек преобразователя попеременно, и магнитное поле, создаваемое катушкой возбуждения, вызывает появление сигнала в соседних катушках. Этот сигнал определяет уровень помех.

Показана перспективность использования трансформаторных матричных преобразователей, конкурентно способных наряду с другими видами преобразователей. Выбран численный метод расчета режимов контроля и оценки сигналов, соответствующих контролируемому и мешающим параметрам. Даны практические рекомендации по выбору режимов контроля.

Исследованы сигналы, создаваемые катушкой возбуждения в соседней с ней измерительной катушке, расположенной вплотную к возбуждающей, когда их взаимное влияние наибольшее. Исследование проведено для преобразователя как без объекта контроля, так и при размещении преобразователя над плоским ферромагнитным объектом и над немагнитными объектами с большой (алюминий) и маленькой (титан) электрической проводимостью.

Сравнение годографов показало возможность отдельного определения электрических и магнитных свойств объектов контроля. Определены сигналы вихретоковых преобразователей для дефектов типа трещин при разных их положениях. Отмечено, что различные положения трещин вызывают сигналы, значительно отличающиеся по фазе. Это дает возможность оценивать положение трещин и их глубину.

Ключевые слова: матричный вихретоковый преобразователь, электрическая проводимость, магнитная проницаемость, коррозия, годограф сигнала.

Studying the Signals Produced by an Eddy Current Array Probe

Yu.V. Mantrova, A.D. Pokrovskiy

Mantrova Yulia V. — Master of MPEI, e-mail: mantrovayv@gmail.com**Pokrovskiy Aleksey D.** — Dr.Sci. (Techn.), professor of Electrical Engineering and Introscopy Dept., MPEI, e-mail: pokrovskyad@mpei.ru

The signal produced by an eddy current array probe is analyzed. Recommendations for the probe geometric parameters and the gap between the probe and the examined object's surface are presented. The effect of electrical conductivity and magnetic permeability is shown, and the possibility to estimate each of them individually is demonstrated. It is shown that the effect caused by corrosion is equivalent to the cumulative effects from the object's magnetic and electrical parameters.

To select the probe parameters, the effect the distance between the coils has on the signal induced by the excitation coil to the adjacent coil was investigated. The excitation current can be applied to each of the probe coils alternately, and the magnetic field generated by the excitation coil induces a signal in the adjacent coils. This signal determines the noise level.

Good prospects of using transformer-type array probes, which are quite competitive with other types of probes, are demonstrated. A numerical method for calculating the test modes and for evaluating the signals corresponding to the examined and interfering parameters is selected. Practical recommendations on selecting the testing modes are given.

The signals generated by the excitation coil in the adjacent measuring coil located close to exciting one the arrangement in which they influence each other to the highest extent---are investigated. The study was carried out for the probe without the tested specimen, and when the probe is placed above a flat ferromagnetic object and above non-magnetic objects with high (aluminum) and low (titanium) electrical conductivity.

A comparison of the obtained loci has shown the possibility of separately determining the electrical and magnetic properties of the examined objects. The signals produced by eddy current probes for crack-like flaws at their different locations have been determined. It is noted that the signals generated in response to cracks having different positions differ significantly from each other in phase. This feature makes it possible to estimate both the position of cracks and their depth.

Key words: eddy current array probe, electrical conductivity, magnetic permeability, corrosion, signal locus.

Достоинством матричных преобразователей является охват большой по сравнению с использованием одиночных преобразователей площади, что повышает производительность контроля и делает ее сопоставимой с контролем проникающими веществами. Матричные магнитные преобразователи [1] не нашли пока широкого применения, поэтому применение вихретоковых матричных преобразователей представляется перспективным. Неразрушающий контроль с использованием матричных вихретоковых преобразователей — это, как правило, расширение классической методики вихретокового контроля.

Матричными вихретоковыми преобразователями комплектуются, например дефектоскопы OmniScan MX ECA [2], Eddyfi Reddy, Eddyfi Ectane [3].

В вихретоковых матрицах используется определенное расположение катушек для обеспечения равномерной чувствительности к дефектам за счет компенсации областей пониженной чувствительности. Такая совместная работа катушек увеличивает чувствительность матричного преобразователя в целом, а также, согласно [4], увеличивает глубину проникновения вихревых токов по сравнению с традиционным вихретоковым методом. Для таких преобразователей нет необходимости в возвратно-поступательном перемещении по контролируемому объекту, как это происходит при классическом вихретоковом контроле. В процессе контроля матричный преобразователь достаточно перемещать вдоль одного направления, и за один проход выявляются дефекты разных форм и пространственной ориентации. По технологическим соображениям

применяются в основном параметрические матричные преобразователи. Сбор данных параметрических преобразователей благодаря использованию мультиплексора позволяет устранить взаимное влияние между отдельными элементами. В трансформаторных вариантах взаимное влияние отдельных элементов может вызываться полями рассеивания катушек возбуждения.

Однако трансформаторные, хотя и несколько сложнее в реализации, имеют ряд преимуществ, в частности, более высокую температурную стабильность. Исследование этих преобразователей и проведено в данной работе.

Для выбора конструктивных параметров преобразователя исследовано влияние расстояния между катушками на сигнал, наводимый катушкой возбуждения на соседнюю катушку. Ток возбуждения может включаться в каждую из катушек матричного преобразователя попеременно, и магнитное поле, создаваемое катушкой возбуждения, вызывает появление сигнала в соседних измерительных катушках. Этот сигнал определяет уровень помех. Исследована зависимость ЭДС, наводимой катушкой возбуждения в соседней с ней измерительной катушке, расположенной вплотную к возбуждающей, когда их взаимное влияние наибольшее. Исследование проведено для преобразователя как без объекта контроля, так и при размещении преобразователя над плоским ферромагнитным объектом и над немагнитными объектами с большой (алюминий) и маленькой (титан) электрической проводимостью.

Из результата, приведенного на рис. 1, видно, что при размещении преобразователя над ферромагнит-

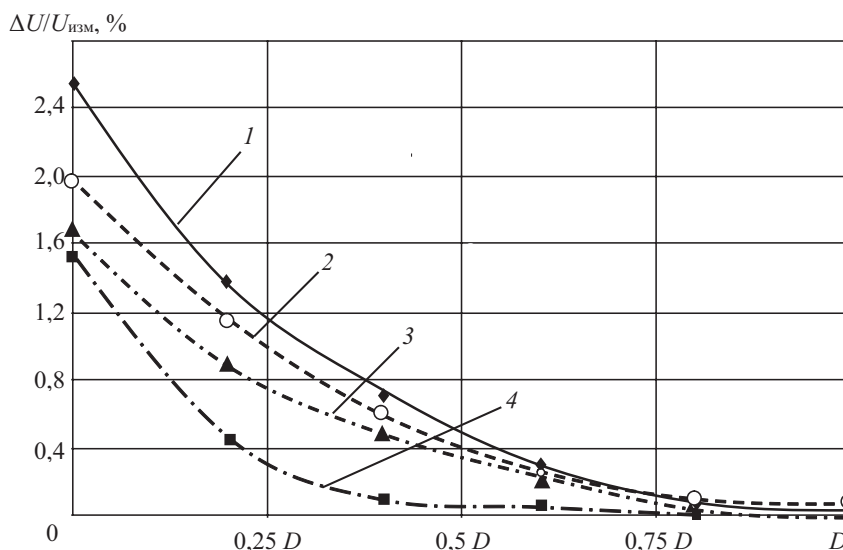


Рис. 1. Влияние поля возбуждения на соседнюю измерительную катушку:

1 — Fe; 2 — без ОК; 3 — Ti; 4 — Al

ным объектом влияние на соседнюю измерительную катушку несколько увеличивается по сравнению со случаем режима холостого хода (без объекта контроля (ОК)), а при размещении над немагнитным объектом — уменьшается. Это влияние не превышает 2 % при минимальном расстоянии между катушками и быстро снижается с увеличением расстояния. Уже при расстоянии в половину диаметра погрешность снижается до половины процента.

Влияние зазора как одного из главных мешающих параметров вихретокового контроля между преобразователем и ферромагнитным образцом показано на рис. 2. Видно, что уже при зазоре, равном 20 % от диаметра катушки, влияние объекта контроля на ЭДС соседней катушки перестает сказываться.

Эти результаты показывают, что с увеличением зазора значение ЭДС, наводимой в соседней катушке, снижается и доходит до значений, соответствующих состоянию катушек в воздухе в отсутствие объекта контроля. Следовательно, при увеличении зазора между контролируемым объектом и преобразователями более чем 0,2 диаметра катушки, воздействия образца на измерительную катушку, расположенную вблизи возбуждающей, практически не будет.

Следующим этапом исследования было моделирование влияния участка коррозии в стальном объекте контроля. Проведен расчет для четырех катушек, из которых одна возбуждающая, а для трех остальных определены значения наводимой ЭДС полем первой возбуждающей катушки. Расположение катушек показано на рис. 3 и соответствует реальному расположению катушек вихретоковых матричных преобразователей [2]. Возбуждающее поле создается только катушкой 1, а в катушках 2, 3 и 4 ЭДС наводится полем рассеивания катушки 1.

Участок коррозии принят вдвое превышающим диаметр катушки. Положение преобразователя моделировалось перемещением его в указанном на рис. 3 направлении.

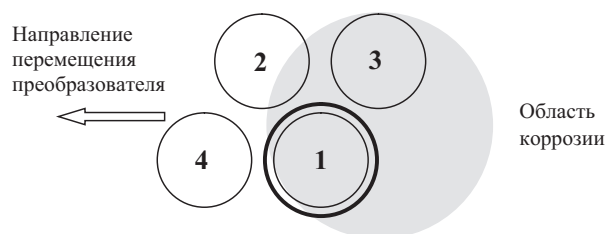


Рис. 3. Расположение катушек при контроле коррозии

Результаты моделирования представлены на рис. 4 и 5, где L — положение участка коррозии относительно начального положения, когда область коррозии расположена точно под катушкой 1. По оси ординат отложены напряжения U^* , нормированные по величине напряжения на катушке 1, когда участок коррозии расположен точно под этой катушкой. По полученным зависимостям можно сделать вывод, что напряжения на катушках 2 и 4 примерно одинаковы, что обусловлено сходным расположением данных катушек относительно участка коррозии. Напряжение на катушке 3 превышает значения на двух других, так как она расположена ближе к возбуждающей и дальше от участка коррозии.

Характер изменения напряжения при перемещении участка коррозии под катушками, в которых нет возбуждающего поля, показан на рис. 5.

В дополнение к проверке влияния положения участка коррозии относительно системы катушек проверено влияние изменений каждого из параметров магнитной проницаемости $\Delta\mu$ и удельной электрической проводимости $\Delta\sigma$, характеризующих свойства участка кор-

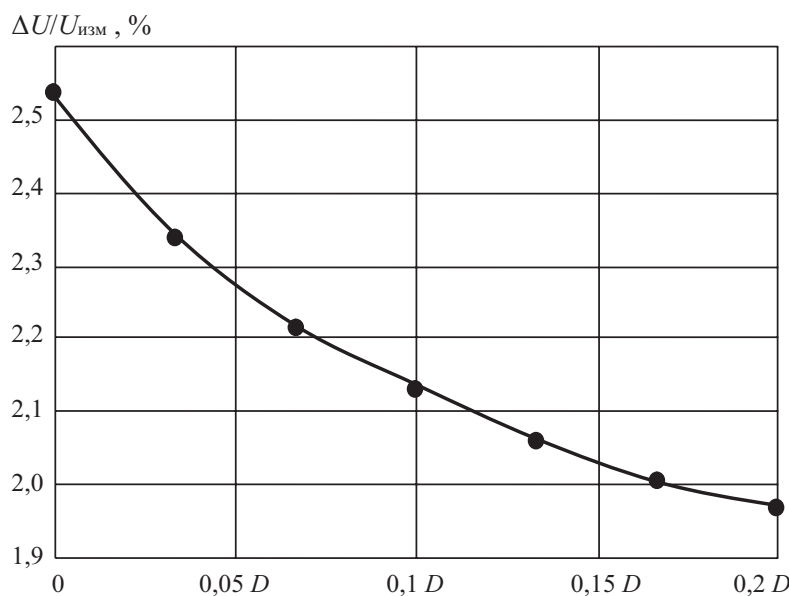


Рис. 2. Зависимость ЭДС в катушке, соседней с возбуждающей, от зазора между преобразователем и ферромагнитным объектом контроля

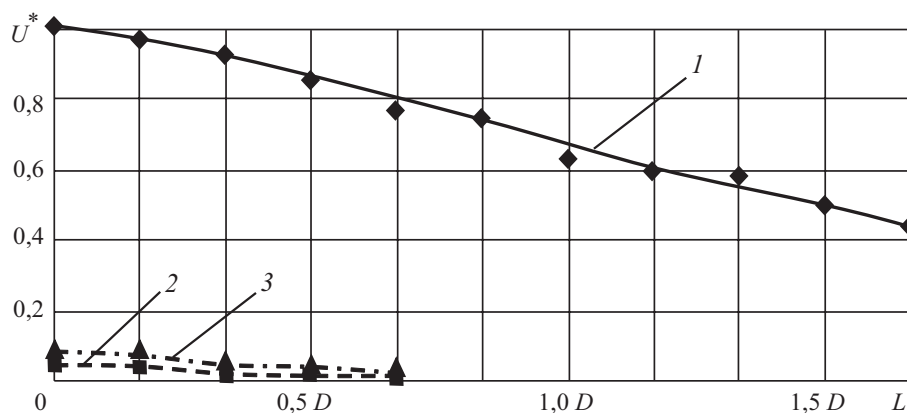


Рис. 4. Напряжения на катушках при перемещении участка коррозии

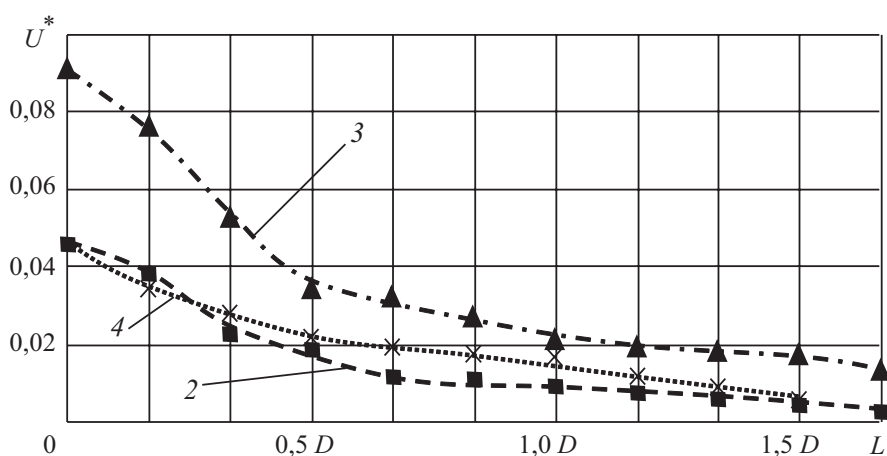


Рис. 5. Напряжения на катушках, в которых нет источника возбуждающего поля

розии. Исследовано влияние уменьшения значений μ и σ от выбранных значений для самого объекта.

Результаты исследования представлены на комплексной плоскости рис. 6. За начальную точку взят участок коррозии, расположенный непосредственно под катушкой, которая создает возбуждающее поле. Это значение соответствует точке 1 на рис. 6.

Изменения μ и σ заданы девятью шагами по 0,1 от исходных значений и завершались величинами, составляющими 10 % от значений, соответствующих параметрам объекта. Точка 2 соответствует остаточному значению σ в 10 % от исходной величины, а точка 3 — такому же значению магнитной проницаемости. Там же приведен годограф выходного напряжения измерительной катушки 1 при перемещении участка коррозии относительно измерительной системы, и точка 4 соответствует выходу участка коррозии за пределы этой катушки. Из приведенных годографов следует вывод, что влияние коррозии на сигналы вихретокового преобразователя эквивалентно комбинации воздействий изменений магнитной проницаемости и удельной электрической проводимости.

Системы матричных преобразователей находят применение в дефектоскопии благодаря тому, что позволяют обнаружить дефект вне зависимости от его по-

ложения относительно катушек. Исследованы сигналы при двух показанных на рис. 7 положениях дефекта типа трещины относительно возбуждающей катушки.

Глубина трещин изменялась до 0,9 от толщины плоского образца с шагом 0,1 толщины образца. Толщина образца составляла 10 мм. Результаты для элемента преобразователя с включенным током возбуждения приведены на рис. 8.

Видно, что различные положения трещин вызывают появление сигналов, значительно отличающихся по фазе. Это открывает возможность оценивать характер положения трещины и ее глубину.

Из сопоставления полученных годографов видна возможность отдельного определения электрических и магнитных свойств объектов контроля. Определены сигналы вихретоковых преобразователей, возникающие в результате взаимодействия магнитного поля преобразователя с поверхностными дефектами типа трещин при их разных положениях относительно контролирующей системы. Исследованы условия контроля коррозии, представленной как комбинация изменений магнитной проницаемости и удельной электрической проводимости.

В проведенной работе проанализирован алгоритм исследования сигналов матричного вихретокового

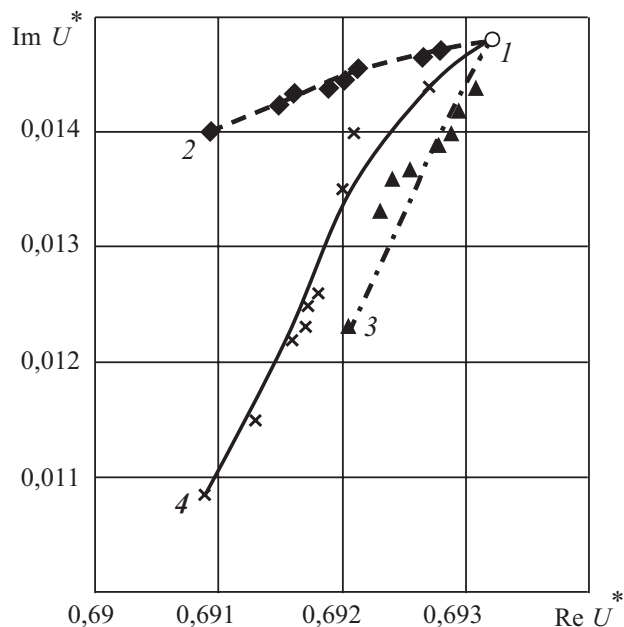


Рис. 6. Годографы сигнала при изменении параметров объекта и перемещении участка коррозии под катушкой возбуждения:

◆ — изменение σ ; ▲ — изменение μ ; × — перемещение участка коррозии

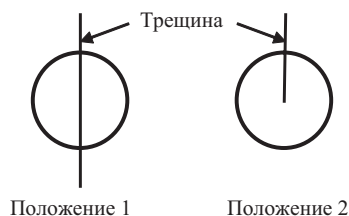


Рис. 7. Положение трещин относительно катушки возбуждения

преобразователя. Получены рекомендации по выбору геометрических параметров преобразователя. Оценено влияние таких мешающих параметров как изменение зазора, колебания электрических и магнитных параметров объекта контроля. Исследовано взаимное влияние отдельных элементов преобразователя. Получены зависимости сигналов при контроле коррозии и при обнаружении дефектов различных положений.

Литература

1. Мамаев А.В., Мелешко Н.В., Покровский А.Д., Хвостов А.И. Матричный магнитный преобразователь в дефектоскопии. Материалы XVII Российской науч.-техн. конф. «Неразрушающий контроль и диагностика». Екатеринбург: ИМАШ УрО РАН, 2005. № Т. 1—4.
2. URL: <http://www.olympus-ims.com/ru/omniscan-eca/>
3. URL: http://www.pergam.ru/catalog/nondestructive_testing/eddy_current_testing/matrix/
4. Беда П.И., Сапунов В.М., Поляков А.И., Путников Ю.Г. Методические рекомендации по применению вихретоковых измерителей электрической

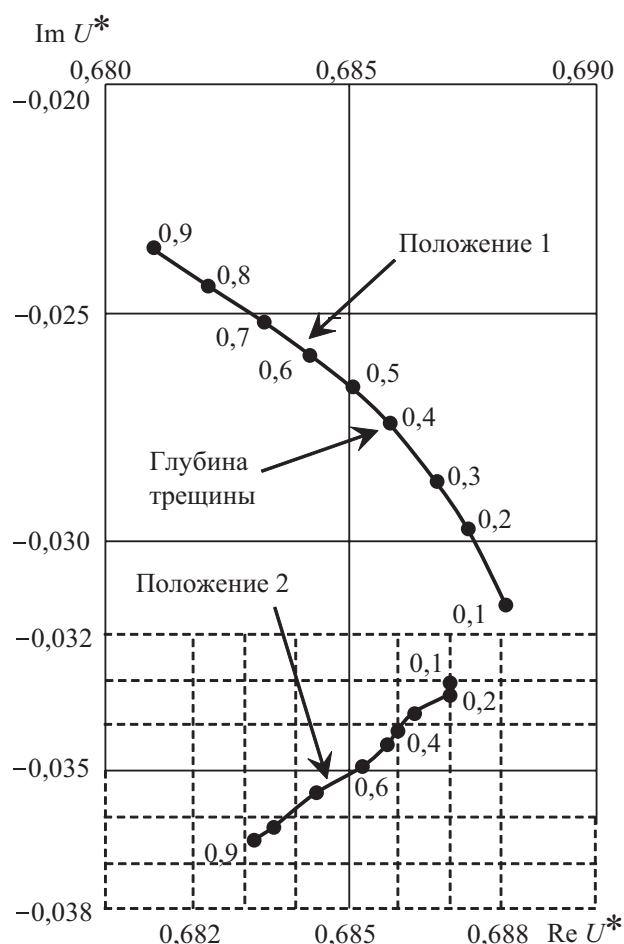


Рис. 8. Изменение сигналов для трещин различной глубины и различного положения

проводимости для контроля свойств немагнитных материалов деталей» авиационной техники // ВВС. 1992. Вып. № 6519.

References

1. Mamaev A.V., Meleshko N.V., Pokrovskij A.D., Hvostov A.I. Matrichnyj Magnitnyj Preobrazovatel' v Defektoskopii. Materialy XVII Rossijskoj Nauch.-Tehn. Konf. «Nerazrushajushhij Kontrol' i Diagnostika». Ekaterinburg: IMASH UrO RAN. 2005;1—4. (in Russian).
2. URL: <http://www.olympus-ims.com/ru/omniscan-eca/>
3. URL: http://www.pergam.ru/catalog/nondestructive_testing/eddy_current_testing/matrix/
4. Beda P.I., Sapunov V.M., Poljakov A.I., Putnikov Ju.G. Metodicheskie Rekomendacii po Primeneniju Vihretokovyh Izmeritelej Jelektricheskoi Provodimosti dlja Kontrolja Svoystv Nemagnitnyh Materialov Detalej» Aviacionnoj Tehniki. VVS. 1992;6519. (in Russian).

Статья поступила в редакцию 07.06.2016