

ИЗСЛЕДВАНЕ НА ВЛИЯНИЕТО НА ОТМЕСТВАНЕТО ВЪРХУ ИЗХОДНИЯ СИГНАЛ НА ВИХРОВОТОКОВ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛ С ПЕРПЕНДИКУЛЯРНИ НАМОТКИ

Ивайло Долапчиев

***Резюме:** Работата представя изследване на влиянието на отместването върху изходния сигнал на вихротоков преобразувател с перпендикулярни намотки. Проведената числена симулация на взаимодействието между преобразувателя и обект с дефект показва минимално влияние на отместването върху изходния сигнал. Същевременно е установено, че при определено разположение на преобразувателя, реалната компонента на изходното му напрежение е пропорционална на дълбочината на дефекта.*

***Ключови думи:** вихротоков преобразувател, ефект на отместването, измеряване на дефект, числен анализ*

AN INVESTIGATION ON THE INFLUENCE OF THE LIFT-OFF EFFECT ON THE OUTPUT SIGNAL OF THE EDDY CURRENT SURFACE PROBE WITH PERPENDICULAR COILS

Ivaylo Dolapchiev

***Abstract:** This work presents an investigation on the influence of the lift-off effect to the output signal of an eddy current surface probe with perpendicular coils. The conducted numerical simulation on the interaction between the probe and a specimen with a flaw show minimal lift-off noise in the output signal. In addition to that it was determined that in some particular probe positions the in-phase component of the signal is proportional to the flaw depth.*

***Keywords:** eddy current probe, lift-off effect, crack sizing, numerical analysis*

1. Въведение

Вихротоковите методи за безразрушителен контрол се използват при повърхностен и подповърхностен контрол на метални изделия. Те са предпочитани заради голямата скорост на контрола, липсата на контакт с изследвания обект и заради възможността контролът да се провежда, както по време на експлоатация на съоръженията така и по време на тяхното производство.

Методите се основават на изследване на разпространението на вихровите токове индуцирани в повърхностния слой на изследвания обект. Всяка промяна в тяхното разпределение се дължи или на наличие на дефекти в структурата или на промяна в електромагнитните свойства на изследвания материал, което се регистрира от вихротоков преобразувател (ВТП). За съжаление изходният сиг-

нал на ВТП зависи не само от особеностите на изследвания обект, но и от разположението на преобразувателя спрямо неговата повърхност.

Конвенционалните ВТП притежават намотки, които са разположени паралелно на изследваната повърхност. Възбудителната им намотка създава променливо магнитно поле, което причинява протичане на вихрови токове в повърхностния слой на изследвания обект. Напрежението, индуктирано в измервателните намотки на ВТП, които са разположени върху повърхността на обекта, е пропорционално на плътността на вихровите токове. Ако не се променя магнитната връзка между намотките и изследвания обект, всяка промяна в индуктираното напрежение следва да се дължи на промяна на неговата хомогенност.

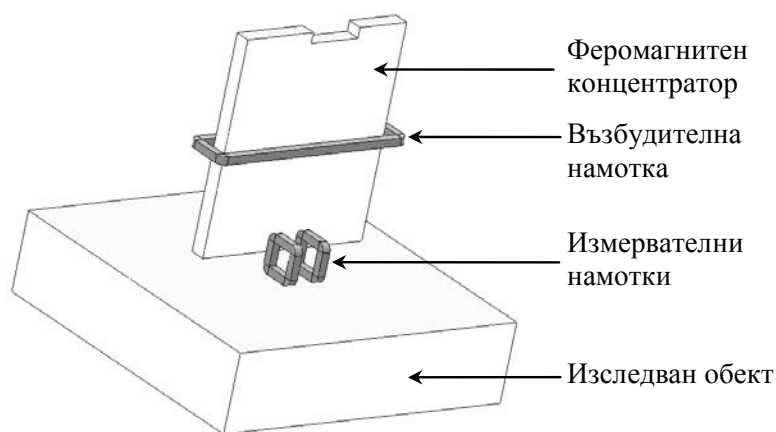
Практическото изпълнение на контрола е свързано с ръчно придвижване на ВТП по изследваната повърхност, което неизбежно променя разстоянието между обекта и ВТП. Това отместване изменя магнитната връзка и предизвиква случайни и съществени изменения в изходния сигнал на ВТП. Използваните методи за намаляване на влиянието на ефекта от отместване са свързани с модифициране на фазата на изходното напрежение на ВТП. Така за свойствата на изследвания обект следва да се съди само по амплитудата на изходния сигнала на преобразувателя, която зависи от всички характеристики на материала и от съществуващите в него нееднородности.

Измервателните намотки на идеалните ВТП следва да събират информация само за промяната на разпространението на вихровите токове, причинено от наличие на дефект. Един от съществените недостатъци на съществуващите конструкции на ВТП е влиянието на магнитното поле на възбудителната намотка върху изходния сигнал на преобразувателя. Неговото изменение под влияние на отместването наподобява наличие на дефект в изследвания материал, което съществено влошава качеството на безразрушителния контрол [1]. Този недостатък на ВТП може да се преодолее, ако възбудителната и измервателни намотки на преобразувателя се разположат в перпендикулярни равнини [2, 3].

Настоящата работа представя изследване на влиянието на отместването върху изходния сигнал на преобразувател, изграден на база приложението на споменатите по-горе принципи [4]. Той комбинира някои от конструктивните особености на известните “theta” и “plus” ВТП, но поради различното разположение на намотките, предлага възможност за определяне на някои параметри на дефектите при подходяща обработка на изходния сигнал.

2. ВТП с перпендикулярни намотки

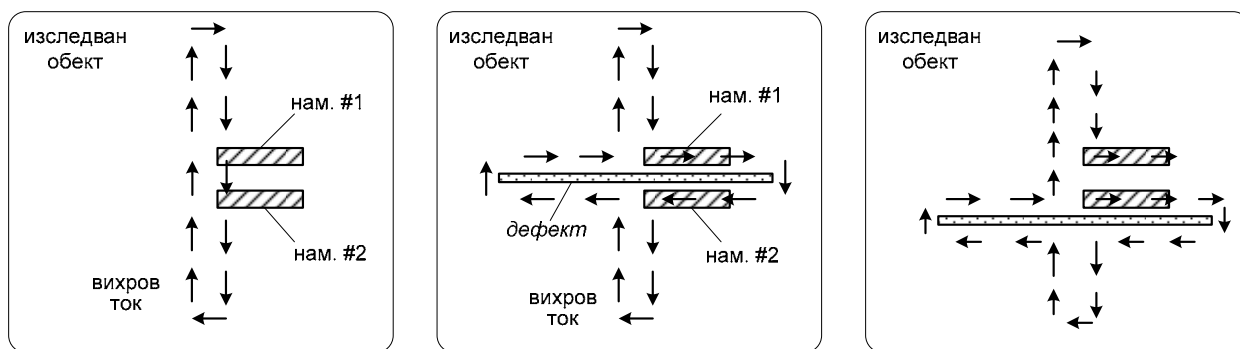
ВТП, предмет на настоящото изследване, се състои от правоъгълна по форма възбудителна намотка навита върху феромагнитен концентратор и две правоъгълни измервателни намотки, поставени тангенциално спрямо повърхността на изследвания обект и феромагнитния концентратор, фиг.1. С помощта на концентратора, създадените в изследвания обект вихрови токове се съсредоточават в участък от повърхността, която наподобява проекцията на възбудителната намотка върху изследвания обект. Разположението на възбудителната намотка е подбрано така, че да се гарантира голяма плътност на вихровите токове в достатъчно широк участък от повърхността на изследвания обект.



Фиг. 1 ВТП с перпендикулярни намотки

Избраното разположение на измервателните намотки гарантира, че при липса на дефект в изследвания обект, вихровите токове протичащи по повърхността на материала ще се движат по оста на намотките и няма да индуцират напрежение в тях, фиг. 2а.

Наличието на дефект в изследвания обект, променя посоката на разпространение на вихровите токове, като част от тях, заобикаляйки дефекта, индуцират напрежение в измервателните намотки, фиг. 2б, 2в. Ако дефектът е разположен в пространството между намотките, индуцираните напрежения са в противофаза, фиг. 2б, а извън това пространство са във фаза, фиг. 2в. Така при серийно свързване на измервателните намотки, ВТП ще генерира изходен сигнал, пропорционален на разликата на индуцираните в тях напрежения, ако дефектът се намира между намотките. Извън тази област изходният сигнал ще е пропорционален на сумата на същите напрежения.



а) обект без дефект

б) обект с дефект между намотките

в) обект с дефект извън намотките

Фиг. 2 Разпространение на вихровите токове в изследвания обект

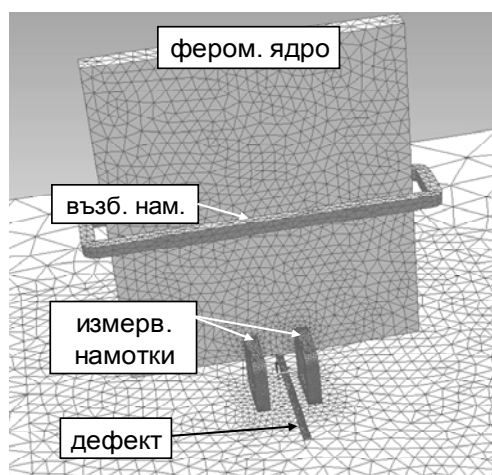
Предлаганата конструкция на ВТП предполага липса на изходен сигнал при отсъствие на дефект, съществено нарастване на амплитудата му в околностите на дефекта и спадане до нулеви стойности при разполагане на измервателните намотки на ВТП симетрично от двете страни на дефекта. Локализирането

на дефекти с подобен ВТП е свързано първоначално с регистриране на съществено нарастване на амплитудата на изходния сигнал, което отразява приближаване до област в материала, притежаваща някаква нееднородност. Последващото сканиране на тази област и установяване на минимална стойност на изходния сигнал позволява да се локализира дефектът.

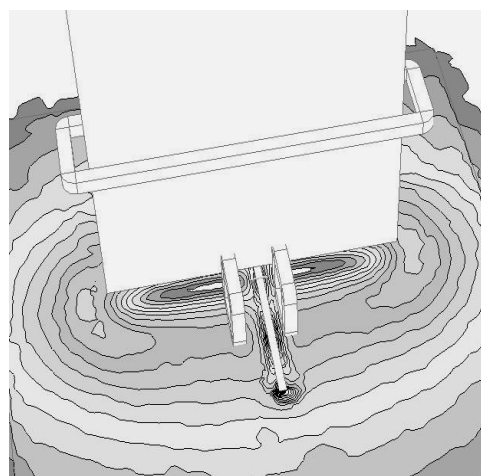
3. Числен анализ на взаимодействието ВТП – изследван обект

Изследването на взаимодействието на разглеждания ВТП с обект с дефект е извършено върху числен модел, който съдържа: феромагнитен концентратор с размери $2 \times 23 \times 27 \text{ mm}$ и относителна магнитна проницаемост 1000, възбудителна намотка и две измервателни намотки. Всички намотки са с напречно сечение 1 mm^2 , като измервателните, които са разположени от едната страна на феромагнитния концентратор са с вътрешни размери $3 \times 3 \text{ mm}$, фиг. 3.

Изследваните обекти са месингови плочи с дебелина 20 mm , всяка една от които съдържа по един дефект с дълбочина 2, 4 или 6 mm и широчини съответно 0,2; 0,4 или $0,6 \text{ mm}$. Дължината на всички дефекти е 20 mm . Дебелината на плочите е избрана да бъде три пъти по-голяма от стандартната дълбочина на проникване на вихровите токове, при използваната честота на тока във възбудителната намотка 20 kHz . Сканирането на повърхността на плочите е извършвано перпендикулярно на дължината на дефекта.



Фиг.3 Изчислителен модел

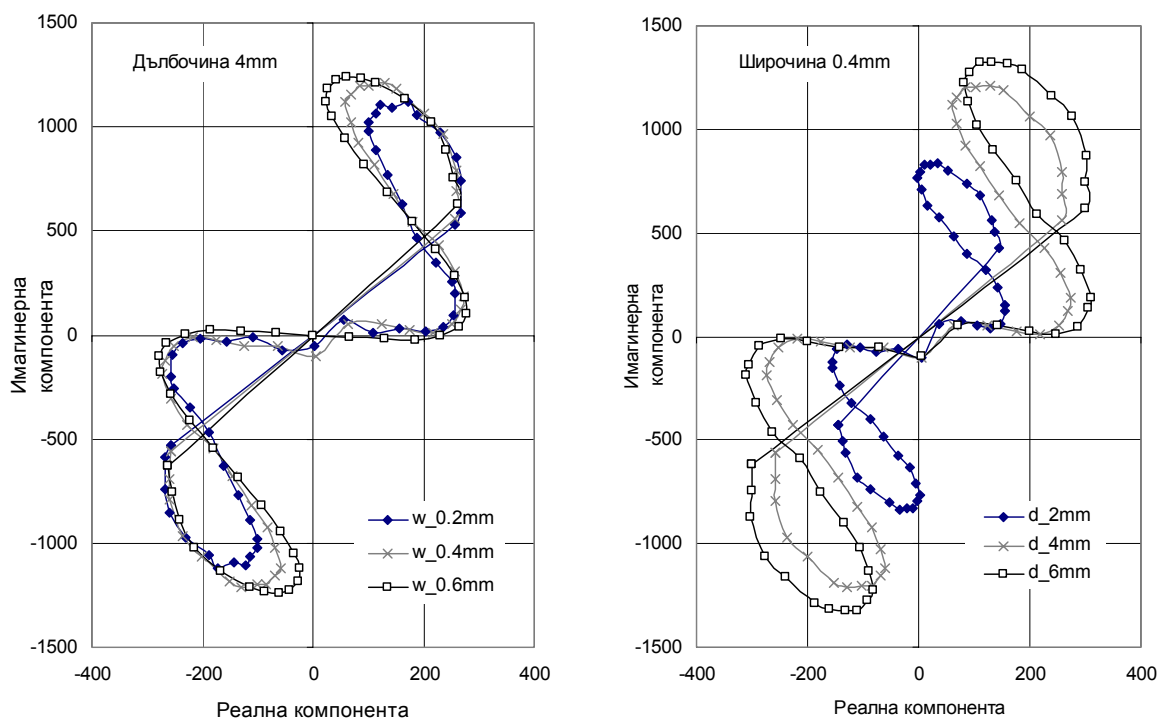


Фиг.4 Разпределение на вихровите токове по повърхността

Описаният модел е използван за провеждане на числена симулация на вихротоков безразрушителен контрол. Анализът на електромагнитното взаимодействие между ВТП и изследвания обект с дефект, се основава на приложение на метода на крайните елементи. Задачата е решена като тримерна с използване на софтуерния пакет Magnet 7.4 [5]. Изчислените стойности на магнитния вектор потенциал във възлите на мрежата от крайни елементи позволяват, да се определи индуктираното напрежение във всяка измервателна намотка, да се изчисли изходния сигнал на ВТП и да се визуализира разпределението на вихровите токове в изследвания обект, фиг. 4.

Симулирането на вихротоковия контрол изисква решаване на електромагнитната полева задача за различни положения на ВТП, равномерно разпре-

делени от двете страни на дефекта. Получените резултати за изходния сигнал на ВТП са представени в комплексната равнина, като са обединени резултатите за дефекти с еднаква дълбочина и широчина, фиг. 5. С увеличаване на широчината на дефекта, кривата на изходния сигнал се деформира към имагинерната ос, т.е. реалната компонента на сигнала намалява, а имагинерната - слабо нараства. Точно противоположно е влиянието на дълбочината на дефекта, където с нарастване на дълбочината, нарастват и двете компоненти на изходния сигнал.



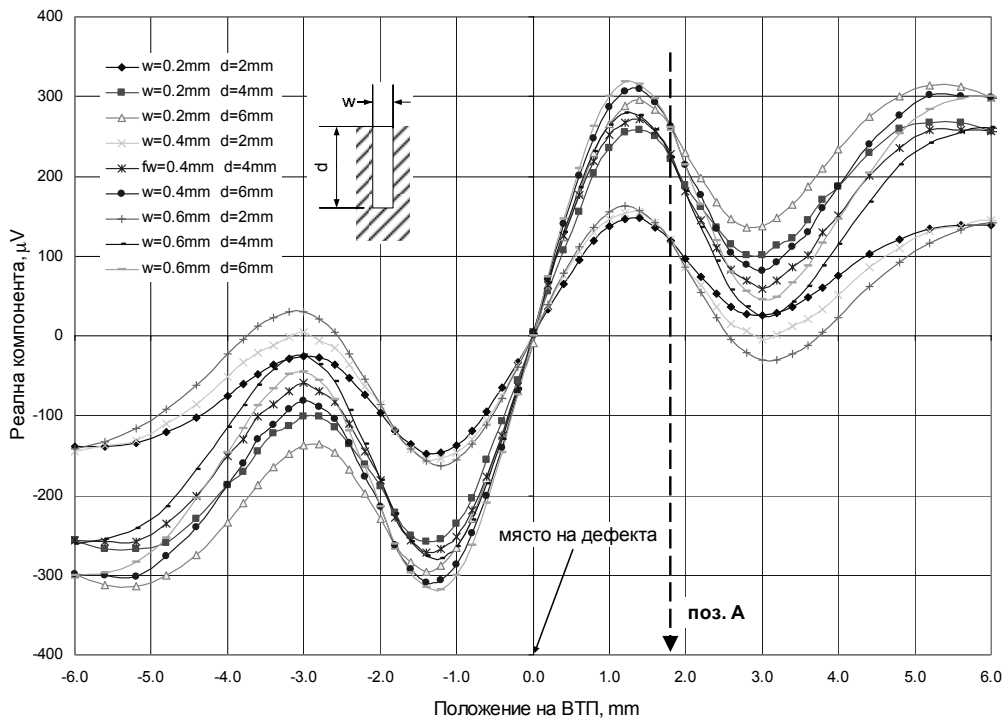
Фиг. 5 Влияние на размерите на дефекта върху изходния сигнал на ВТП

Анализът на изменението на изходния сигнал на ВТП в процеса на сканиране показва, че при определени положения на преобразувателя спрямо дефекта, е възможно да се извлече информация за неговата дълбочина. Реалната компонента на сигнала приема нулева стойност, когато дефектът е равно отдалечен от двете намотки. При отклонение от това положение, тази компонента рязко нараства и при разполагане на една от намотките върху дефекта, характеристиката се стреми към локален екстремум, фиг. 6. Излизането на дефекта от тази област предизвиква ново нарастване на реалната компонента, която след отдалечаване от дефекта, постепенно намалява до достигане на нулева стойност.

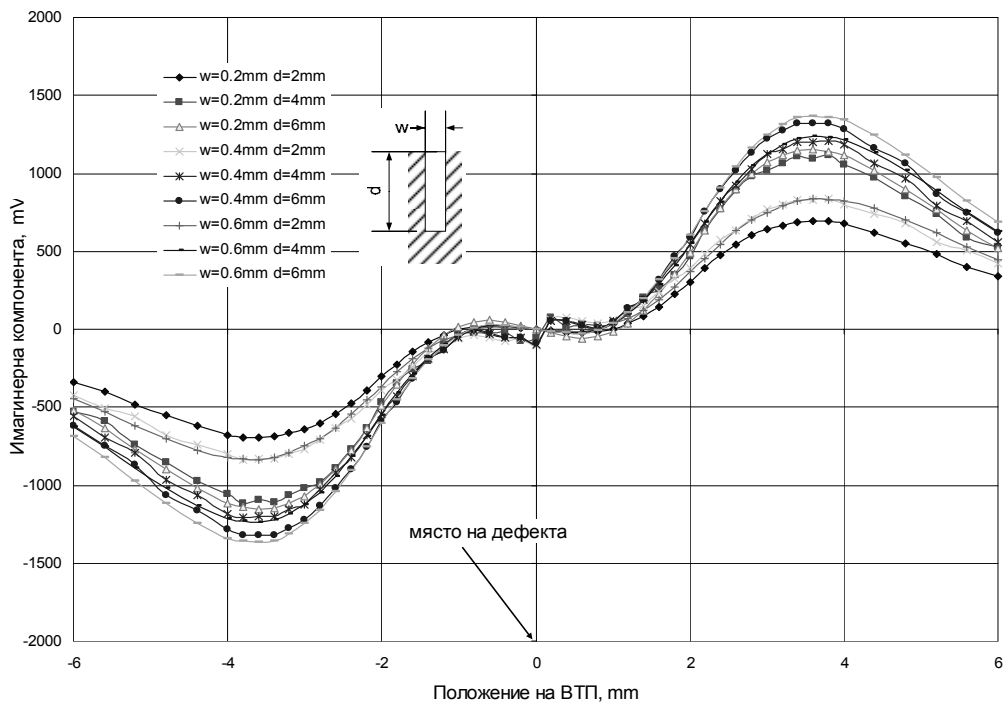
Проведените изследвания показват, че независимо от размера на дефекта, реалната компонента на изходния сигнал на ВТП приема нулева стойност, когато измервателните намотки на ВТП са разположени симетрично от двете страни на дефекта. Същевременно при навлизане на дефекта под една от измервателните намотки, разглежданата компонента на изходния сигнал не се влияе от широчината на дефекта, а само от дълбочината му (поз. А, фиг. 6).

Въпреки своята значителна амплитуда, изменението на имагинерната компонента на изходния сигнал не предлага възможности за определяне на останалите параметри на дефекта. Тя също приема нулева стойност, когато дефектът е разположен в средата на областта между измервателните намотки. Извън

тази област, нейната амплитуда нараства, след което постепенно затихва с отдаляване на дефекта от зоната на контрола, фиг. 7.



Фиг. 6 Изменение на реалната компонента на изходното напрежение

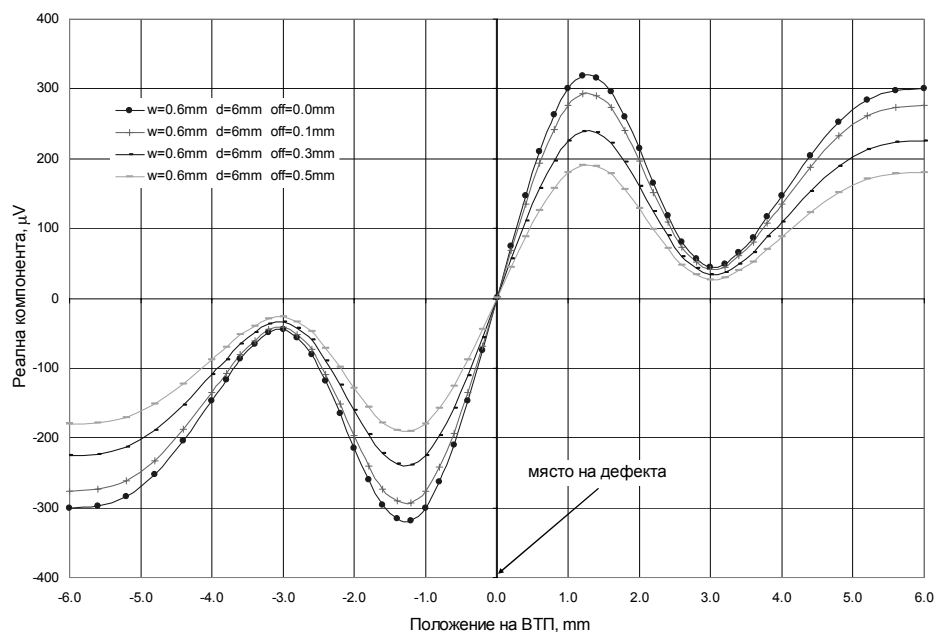


Фиг. 7 Изменение на имагинерната компонента на изходното напрежение

Изследваните дефекти са с дължина надвишаваща многократно размера на контролираната от ВТП област, поради което влиянието и не е анализирано.

4. Влияние на отместването върху изходното напрежение на ВТП

Изследването на влиянието на отместването на ВТП е проведено чрез решаване на описаната електромагнитна полева задача за всичките образци с дефекти при промяна на разстоянието между ВТП и изследвания обект. Използваните стойности на отместването “ off ” са от 0,1mm до 0,5mm със стъпка 0,1mm. Отместването не променя характера на разпространение на вихровия ток, но предизвиква намаляване на неговата плътност, което съчетано с влошената магнитна връзка между образеца и ВТП намалява амплитудата на индуцираните в измервателните намотки напрежения. Получените резултати за изменение на реалната компонента на изходното напрежение за образеца, притежаващ дефект с най-големи размери, са представени на фиг. 8.



Фиг. 8 Изменение на реалната компонента на изходното напрежение при различни стойности на отместването “ off ”

Имагинерната компонента на изходното напрежение също намалява амплитудата си с отместване на ВТП, но запазва характерът си на изменение. И двете компоненти приемат близки до нулата стойности когато измервателните намотки на ВТП са разположени от двете страни на дефекта и са еднакво отдалечени от него. В околностите на дефекта, с нарастване на отместването, промяната на изходния сигнал на ВТП е по-слабо изразена.

5. Заключение

Работата представя резултатите от изследването на нов тип ВТП предназначен за повърхностен вихровотоков контрол на електрически проводящи обекти. Предложената конструкция на преобразувателя гарантира минимално влияние на отместването при локализиране на нееднородности в материалите. Използваната комбинация от малки по размери измервателни намотки, съчетана с наличие на феромагнитен концентратор във възбудителната намотка, ограничава разпространението на вихровия ток в материала и намалява влиянието на

дължината на дефекта върху изходния сигнал. Същевременно разполагането на двете измервателни намотки в различни равнини, променя съществено характера на изменение на изходния сигнал ВТП при наличие на дефект.

Представеният ВТП притежава характеристики, които съществено го отличават от използваните преобразуватели. Конвенционалните ВТП регистрират наличието на дефекти при рязка промяна в амплитудата на изходното си напрежение, което ги прави силно зависимо от отместването. В разглеждания ВТП промяната в изходното напрежение настъпва при приближаване на областта от изследвания обект съдържаща дефект. Локализирането на дефекта съответства на намиране на такова положение на ВТП, при което изходния му сигнал е близък до нула. В това положение, точността на идентификация на дефекта не зависи от големината на реализираното отместване.

Избраната конструкция на ВТП предлага и някои предимства при обработката на изходния сигнал с цел определяне на определени размери на откритите дефекти. Очаква се, че при подходяща оптимизация на тази конструкция, могат да се създадат преобразуватели, които ще повишат надеждността и ще подобрят качеството на вихротоковия безразрушителен контрол.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] H. Jansen, *Eddy Current Testing: Profiled eddy current probes for complex shape inspection*, 18-th World Conference on Non destructive Testing, South Africa, April 2012.
- [2] H. Hoshikawa, K. Koyama, and H. Karasawa, *A new ECT surface probes without lift-off noise and with phase information on flaw depth*, Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, vol. 20, pp. 969-976, 2001.
- [3] H. Hoshikawa, K. Koyama, and M. Meada, *A new ECT surface probe for short flaws with minimal lift-off noise*, Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, vol. 22, pp. 413-418, 2003.
- [4] I. Dolapchiev, *A new eddy current surface probe with perpendicular coils*, JAPMED'9 9th Japanese-Mediterranean Workshop on Applied Electromagnetic Engineering for Magnetic, Super-conducting, Multifunctional and Nanomaterials, Sofia, Bulgaria, July 2015
- [5] <http://www.infolytica.com/en/products/magnet/>

Автор: Ивайло Драгомиров Долапчиев, доц. д-р – катедра ”Обща електротехника”, Електротехнически факултет, Технически Университет – София, e-mail adress: ivailodo@tu-sofia.bg