

# ИЗСЛЕДВАНЕ НА ЗАТИХВАНЕТО В РАЗЛИЧНИ НАПРАВЛЕНИЯ НА ВИХРОВИТЕ ТОКОВЕ В ПЛОСКИ СРЕДИ ПРИ ИМПУЛСНО ВЪЗБУЖДАНЕ

Калинка Тодорова

**Резюме:** При проникване на електромагнитно поле във проводяща среда в нея се индуцира е.д.н. и протичат вихрови токове. Разпределението и интензивността на тези вихрови токове зависят, както от геометричните и електрофизичните параметри на средата, така и от параметрите на възбудителната намотка. За целите на безразрушителния вихротоков контрол е важно да се познава разпределението в различни направления на вихровите токове в контролирания обект (КО). В работата на базата на разработен модел в средата на Mag Net 7.4 е проведен числен експеримент и е изследвано затихването в различни направления на вихровите токове, индуцирани в КО, при източник на периодичен импулсен възбудителен ток с правоъгълна форма на импулса. Изследването е проведено, като в модела е въведена параметризация по отношение на специфичната електрическа проводимост на КО.

**Ключови думи:** МКЕ, ударно възбуждане, импулсен вихротоков преобразувател

## STUDY ATTENUATION IN DIFFERENT DIRECTIONS EDDY CURRENT IN A FLAT MATERIAL AT PULSE EXCITATION

Kalinka Todorova

**Abstract:** Penetration of the electromagnetic field in a conducting material in it induces voltage and flow eddy currents. The distribution and intensity of these eddy currents depends, both the geometric parameters and the electro physical object parameters, and the parameters of the exciting coil. For the purpose of non-destructive eddy current control it is important to know the distribution in different areas of eddy currents in the controlled object (CO). In the work on the basis of the model developed with Mag Net 7.4 numerical experiment was carried out and is tested in different directions the attenuation of eddy currents induced in the CO, wherein the source of periodic impulse excitation current rectangular pulse. The study was conducted as a model parameterization was introduced to address the specific electric conductivity of the CO.

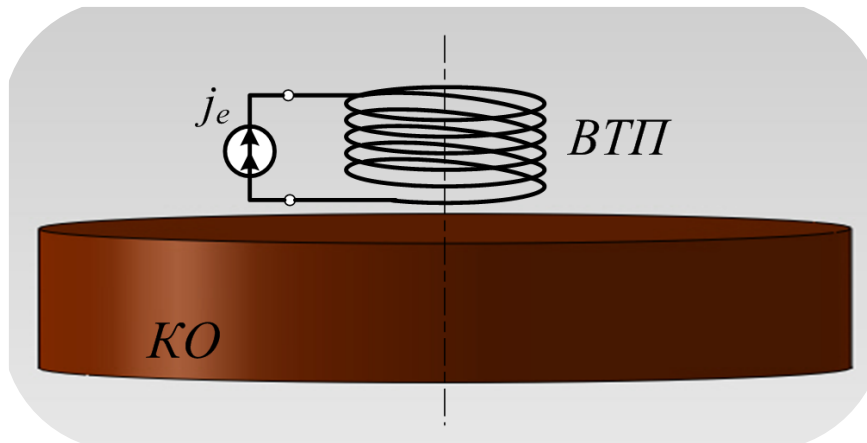
**Key words:** FEM, shock excitation, pulse eddy current transducer

## 1. Въведение

Все по – често при използване на вихротоковият контрол се прилагат импулсни методи [2, 3, 4, 5, 6]. При проникване на електромагнитно поле във проводяща среда в нея се индуцира е.д.н. и протичат вихрови токове. При определяне на зоната на контрол възниква въпросът какво е разпределението на тези вихрови токове в контролирания обект [1]. Целта на работата е да се изследва затихването на вихровите токове в различни направления в контролиран обект при импулсно възбуждане.

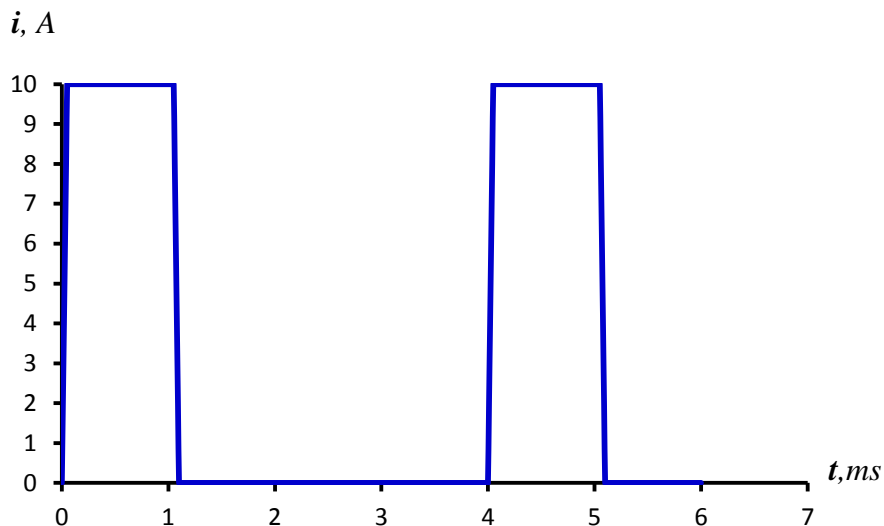
## 2. Постановка на задачата

Разглежда се вихротоков преобразувател (ВТП), който е параметричен, и е включен в схема с идеален източник на ток (фиг. 1).



Фиг. 1

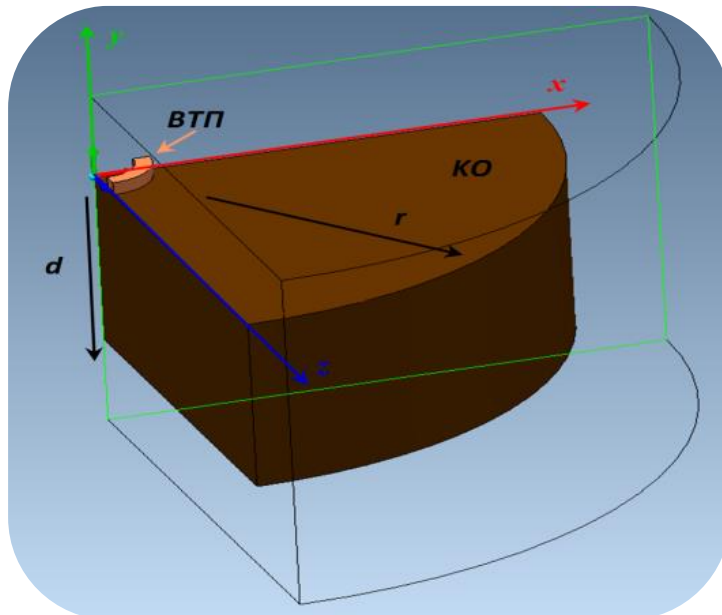
Възбудителният ток на ВТП е периодична поредица от импулси с правоъгълна форма на импулса (фиг. 2) и с честота  $f=0.25\text{ kHz}$ .



Фиг. 2

В средата на продукта MagNet 7.4 е създаден числен модел, състоящ се от ВТП и контролиран обект (КО) (фиг. 1). Входен сигнал за ВТП е токът  $i = j_e$ , а изходен – напрежението  $u$ . ВТП е цилиндрична намотка от меден проводник.

Преобразувателят и КО са съосни. ВТП е разположен много близо над КО, който от своя страна е ферромагнитен ( $\mu=100$ ) проводящ цилиндър със специфична електрическа проводимост  $\sigma$ , променяща се от 0,01 MS/m до 200 MS/m. Чрез числения модел се изследва разпространението в дълбочина  $d$  и по радиус  $r$  на вихровите токове в КО (фиг. 3).

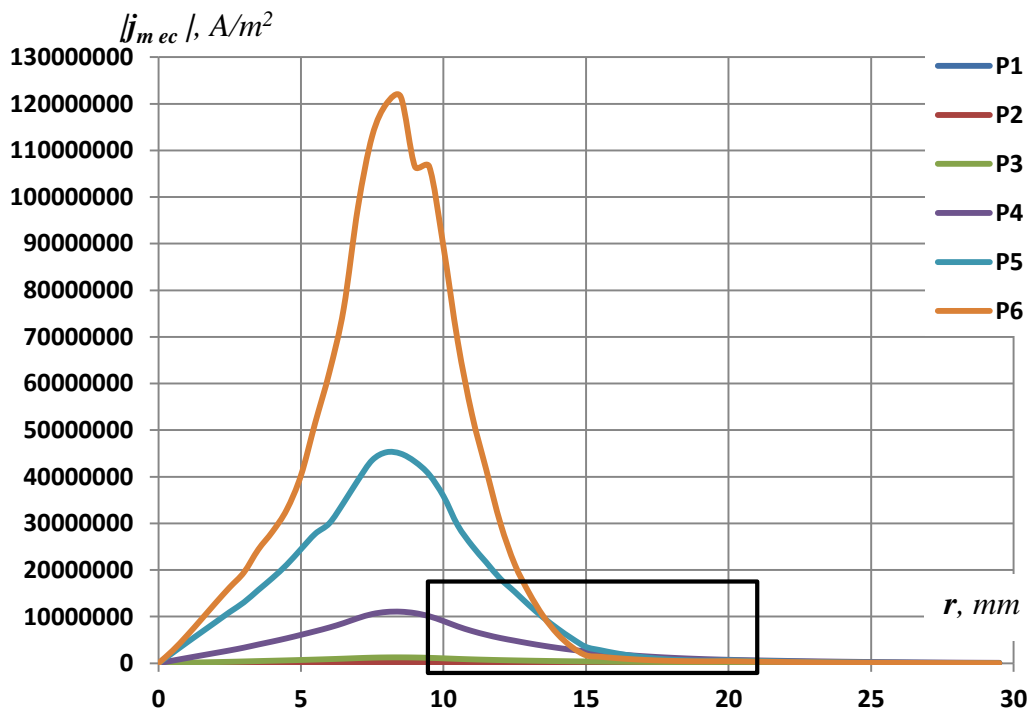


Фиг. 3

Задачата (електрическа верига – полева задача) се решава по метода с крайните елементи [7].

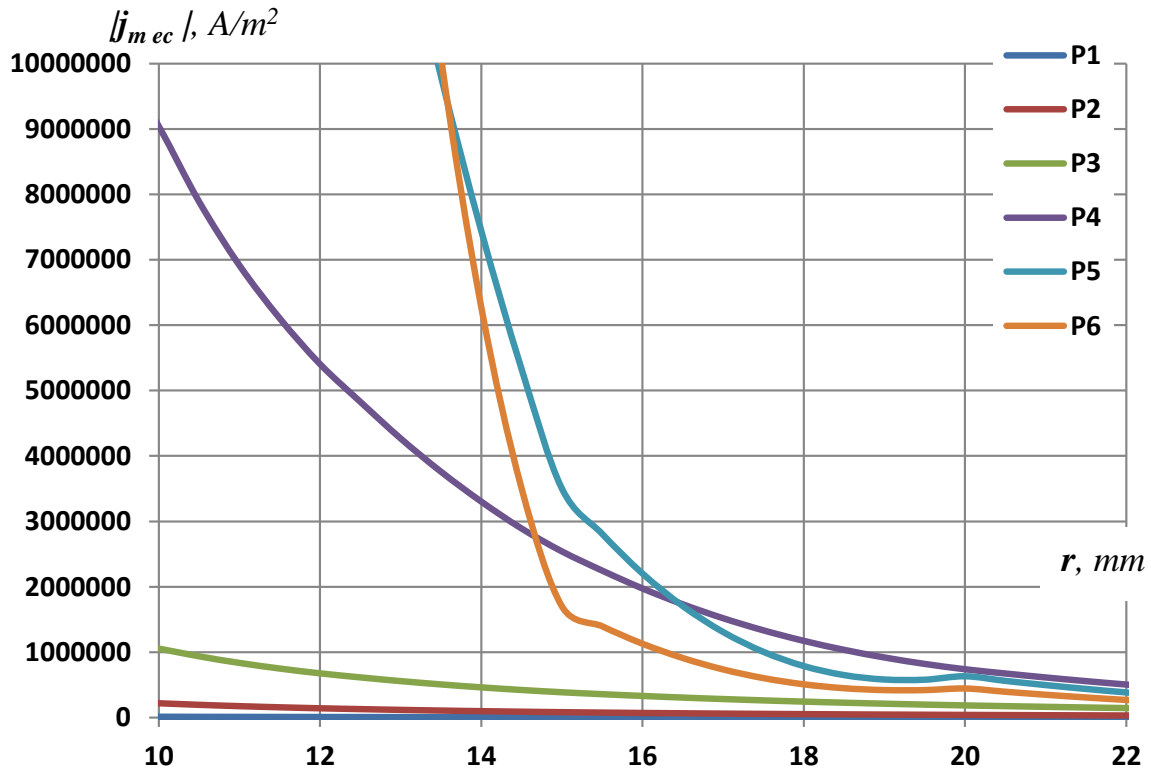
### 3. Резултати от числените експерименти

Разпространението на вихровите токове по направление на радиуса на КО се изяснява от зависимостта  $j_{mec}(r)$ .



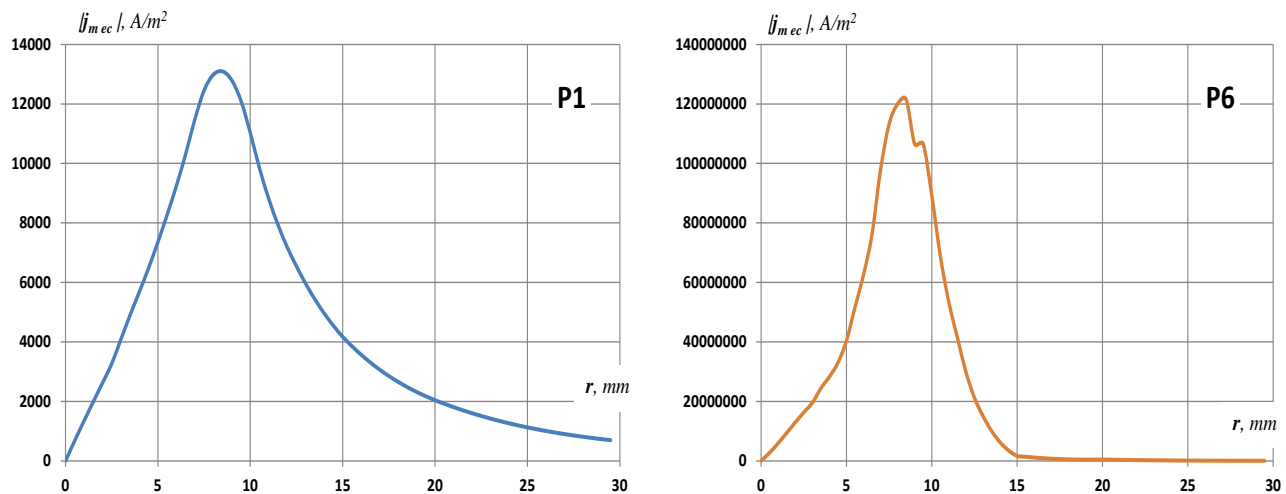
Фиг. 4

Зависимостите на моментната стойност  $j_{mec}$  на вихровия ток, индуциран в КО, от разстоянието  $r$  от оста на намотката в момента  $t=0,05$  ms при  $d = 0,01$  mm за проводимости на КО  $\sigma = 0,01$  (P1); 0,2 (P2); 1 (P3); 10 (P4); 50 (P5); 200 (P6) MS/m са показани на фиг. 4. Участъци от тези зависимости (ограничени от правоъгълника), увеличени, са показани на фиг. 5.



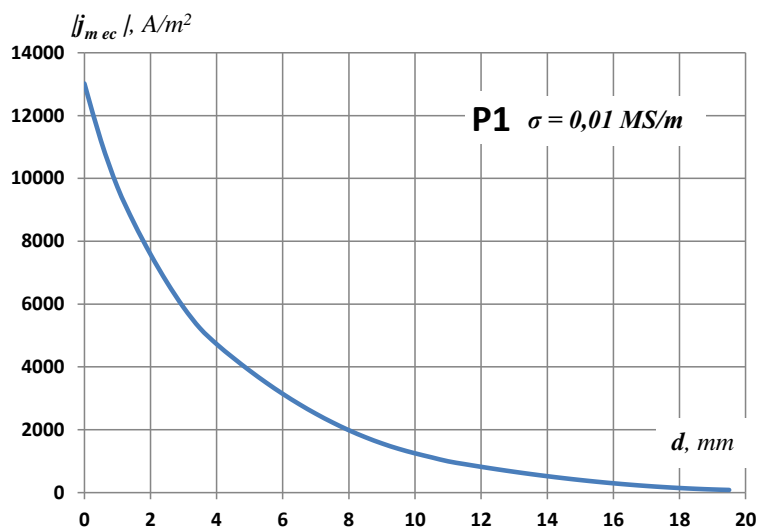
Фиг. 5

Тъй като порядъка на моментната стойност  $j_{mec}$  на вихровия ток за различните проводимости на КО силно се различава, за изясняване на характера на разпространение на вихровите токове по направление на радиуса на обекта, на фиг. 6 са показани зависимостите  $j_{mec}(r)$  за P1 ( $\sigma = 0,01$  MS/m) и P6 ( $\sigma = 200$  MS/m).



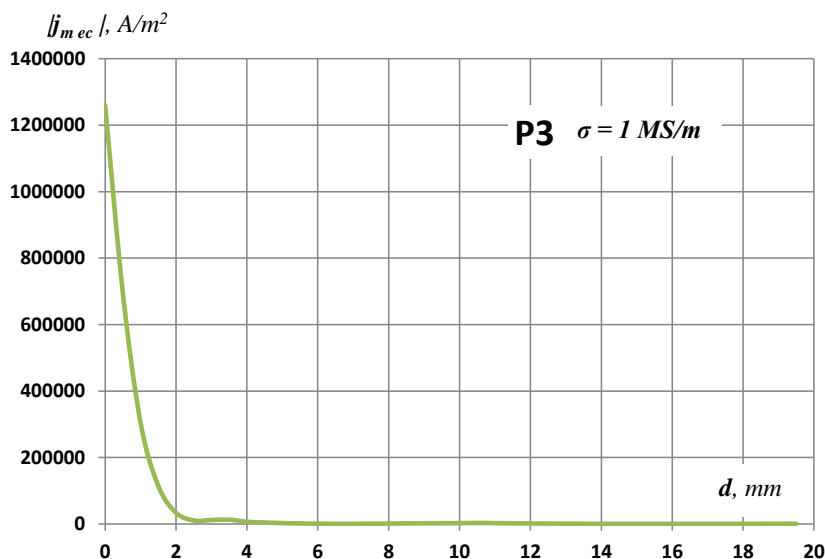
Фиг. 6

Зависимостта  $j_{mec}(d)$  показва разпространението на вихровите токове в дълбочина в КО. На фиг. 7, 8 и 9 са показани зависимостите на моментната стойност  $j_{mec}$  на вихровия ток в КО от дълбочината на проникване  $d$  в момента  $t=0,05$  ms за  $r=8$  mm при  $\sigma=0,01$  (P1); 1 (P3); 200 (P6) MS/m, която за всички случаи е абсолютен максимум.



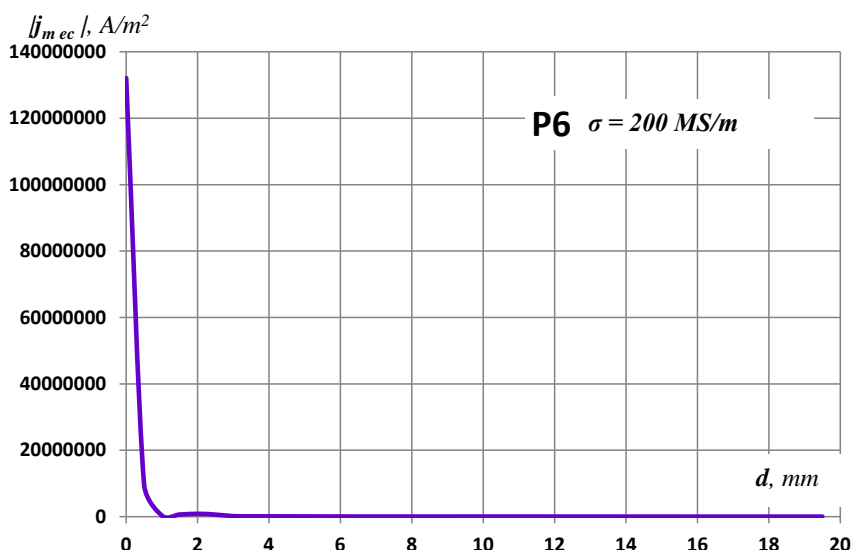
Фиг. 7

При малки проводимости на КО ( $\sigma=0,01$  MS/m (P1) – фиг. 7) затихването на вихровите токове в дълбочина има експоненциална форма, т.е. подобно е на аналогичните зависимости при синусоиден възбудителен ток.



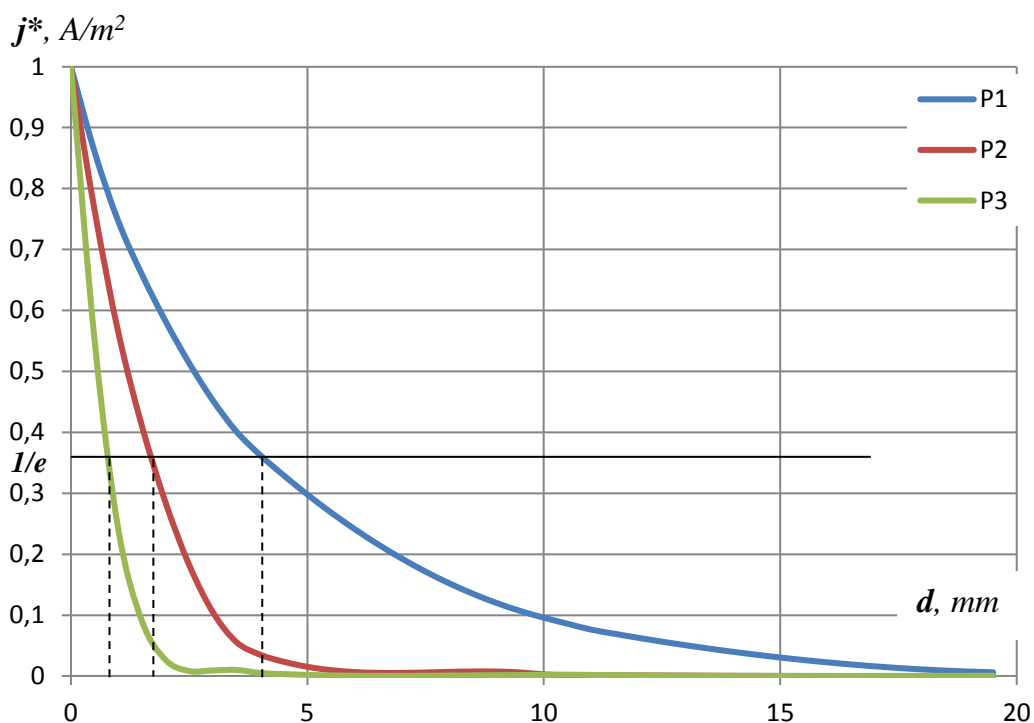
Фиг. 8

При средни и големи стойности на проводимостта на контролирания обект ( $\sigma=1$  MS/m (P3) – фиг. 8;  $\sigma=200$  MS/m (P6) – фиг.9) затихването в дълбочина на вихровите токове очевидно е много по-бързо отколкото при малки проводимости.



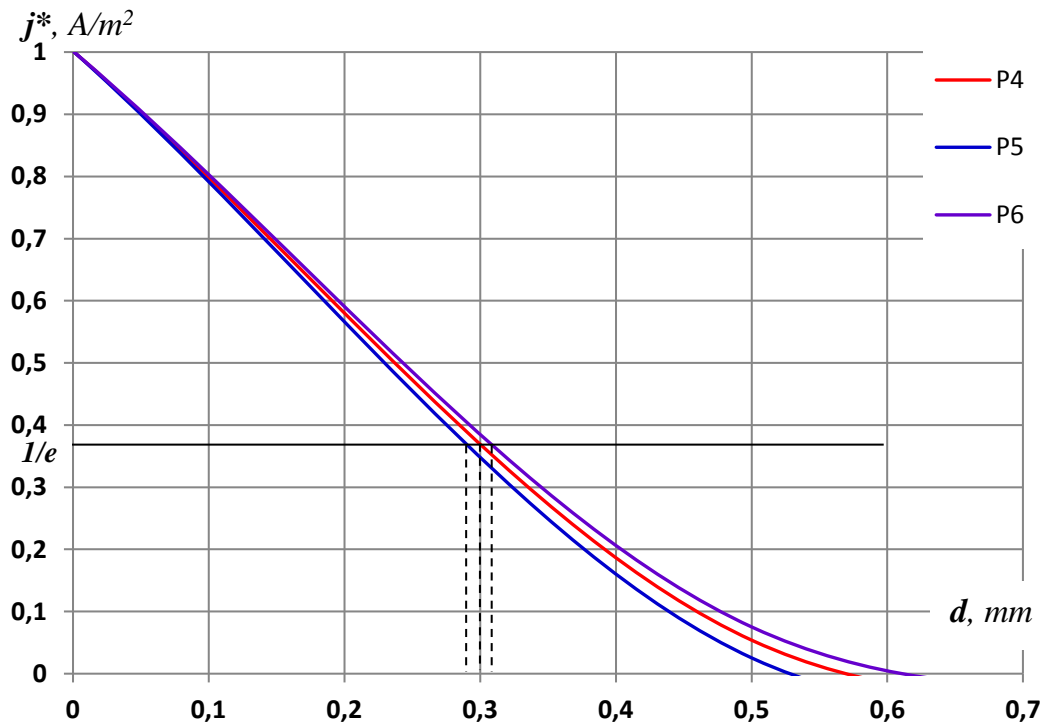
Фиг. 9

Много често при вихротоковия контрол за оценка на съответни величини се използват техните нормирани стойности. Зависимости на нормираната моментната стойност  $j^*_{mec}$  на вихровия ток в КО от дълбочината на проникване  $d$  за  $r=8 \text{ mm}$  в момента  $t=0,05 \text{ ms}$  за проводимости на КО  $\sigma = 0,01$  (P1);  $0,2$  (P2);  $1$  (P3) MS/m са показани на фиг.10, а за проводимости  $\sigma = 10$  (P4);  $50$  (P5);  $200$  (P6) MS/m – на фиг. 11.



Фиг. 10

На тези фигури е показан начин за определяне на дълбочината  $d$  на затихване на вихровите токове – важен параметър при определяне на зоните на контрол при вихротоковите методи.



Фиг. 11

Известно е [1], че при синусоидални режими дълбочината на проникване на електромагнитното поле се определя от зависимостта

$$(1) \quad \delta = 2 / \sqrt{\mu \cdot \sigma \cdot \omega} \quad ,$$

където  $\delta$  е дълбочината, на която плътността на вихровите токове практически затихва. Ако приложим тази зависимост, за да определим дълбочината на затихване на вихровите токове в изследвания обект от разработения числен модел при синусоидален възбудителен ток, ще получим

- за случай P1,  $\sigma = 0,01 \text{ MS/m}$        $\delta_{P1} = 45 \text{ mm}$  ;
- за случай P4,  $\sigma = 10 \text{ MS/m}$        $\delta_{P4} = 1.4 \text{ mm}$  .

При сравнение на тези стойности за съответните случаи с дълбочината  $d$  на проникване на вихровите токове при импулсен възбудителен ток, която може да се определи от фиг. 10 за P1 и от фиг. 11 за P4, се вижда, че те се различават.

#### 4. Заключение

От проведените числени експерименти и получените резултати може да се направят следните изводи:

- При различни специфични проводимости на КО (в широк диапазон на изменение), когато се използва импулсен възбудителен ток с правоъгълна форма на импулса, скоростта на затихване на плътността вихровите токове по направление на радиуса на цилиндричен контролиран обект силно се различава за различните проводимости на КО – плътността на вихровите токове затихва

значително по-бързо при по-големи стойности на специфичната електрическа проводимост  $\sigma$  на КО;

- От получените резултати от числените експерименти за изследване на затихването на плътността на вихровите токове в дълбочина  $d$  на КО и сравнението им с дълбочината на затихване на плътността на вихровите токове при синусоидален възбудителен ток, става ясно, че формула (1) не може еднозначно да се прилага и при импулсни възбудителни режими.

### **Благодарност**

Научните изследвания, резултатите от които са представени в настоящата публикация, са финансирани по договор ДФНИ Е02/8 с Фонд „Научни изследвания“ при МОН.

### **ЛИТЕРАТУРА**

- [1] Цветков Д. и кол., Електромагнитна дефектометрия, ДИ „Техника“, София, 1981
- [2] Eddy Current Testing at Level 2: Manual for the Syllabi Contained in “Training Guidelines for Non Destructive Testing Techniques”, IAEA-TECDOC-628. Rev.2, Vienna, 2011
- [3] Zergoug M., N.Boucherrou, MATERIAL CHARACTERIZATION BY PULSED EDDY CURRENT,
- [4] Preda Gabriel, Mihai Rebican, Florea Ioan Hantila, PULSE EDDY CURRENTS USING AN INTEGRALFEM FORMULATION FOR CRACKS DETECTION, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics 33 (2010), 1225–1229
- [5] Smetana Milan, Tatiana Strapacova, Ladislav Janousek, Klara Capova, PULSED EDDY CURRENTS: A NEW TREND IN NON-DESTRUCTIVE EVALUATION OF CONDUCTIVE MATERIALS, 17th Symposium IMEKO TC 4, 3rd Symposium IMEKO TC 19 and 15th IWADC Workshop Instrumentation for the ICT Era Sept. 8-10, 2010, Kosice, Slovakia, 238-243
- [6] Michniaková Mária, Ladislav Janoušek, Milan Smetana, IMPACT OF PROBE CONFIGURATION ON CRACKS DEPTH RESOLUTION IN PULSED EDDY CURRENT NON-DESTRUCTIVE EVALUATION, Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review), ISSN 0033-2097, R. 88 NR 7b/2012, 226-228
- [7] [www.infolytika.com](http://www.infolytika.com)

### **Автори:**

д-р инж. Калинка Тодорова – гл. ас. в катедра “Обща електротехника” (ОЕ),  
email: [ktodorova@tu-sofia.bg](mailto:ktodorova@tu-sofia.bg)

Постъпила на хх.хх.2015 г.

Рецензент: доц. д-р Стефчо Гунински