

## ТОПЛИНЕН И ЕЛЕКТРОМАГНИТЕН АНАЛИЗ НА ДЪЛЪГ ИНДУКТОР ЗА ОБЕМНО НАГРЯВАНЕ

Христо Ибришимов, \*Минчо Симеонов

Технически университет Габрово, Факултет „Електротехника и Електроника“,  
кафедра „Електроника“, Габрово 5300, България, ул. „Х. Димитър“ 4, [ico@tugab.bg](mailto:ico@tugab.bg).

\*Технически университет Габрово, Факултет „Електротехника и Електроника“,  
кафедра „Електроника“, Габрово 5300, България, ул. „Х. Димитър“ 4, [symeon@tugab.bg](mailto:symeon@tugab.bg).

## THERMAL AND ELECTROMAGNETIC ANALYSIS OF A LONG VOLUMETRIC HEATING INDUCTOR

### ABSTRACT:

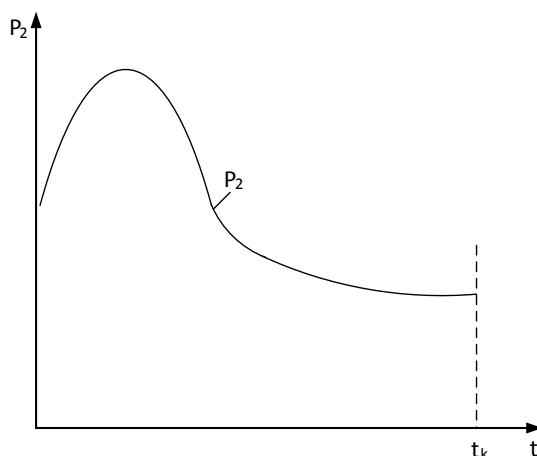
In this paper thermal fields by inductor of volume heating have been researched. Solving the equations has been achieved on the basis by means of the finite elements method, taking into the non-linearity of the characteristics of the material used. The analysis has been expanded by modeling the process by means of COMSOL Multiphysics 4.3.a. The obtained results confirm the correctness of the developed methods compared with the manufacturing and power parameters of the supply source according to power, current and frequency of the example taken from practice.

**Key words:** induction heating, electromagnetic fields, thermal fields, finite element method, optimization.

### ВЪВЕДЕНИЕ

В индукторите използвани за обемно индукционно нагриване (ИН) [1], обикновено се помещават от няколко до няколко десетки детайли в индуктора. По време на нагриването те се придвижват по дължината му, като на входа постъпват „студени“ детайли. Така всяка детайл, се премества през определено време  $t_0$ , и преминава през целия индуктор. Времето  $t_0$  се нарича такт на подаване на заготовките и е важен технологичен параметър не само за електрическите параметри на устройствата за индукционно нагриване, но и за технико – икономическите параметри на използваната технология. Връзката между такта на подаване и времето за нагриване  $t_k$  се дава с израза:

$$t_k = nt_0 \quad (1)$$



Фиг.1. Зависимост на специфичната мощност приведена в заготовката от времето за нагрив.

където  $n$  е брой детайли в индуктора.

За определяне на дължина на индуктора и времето  $t_k$  за достигане на необходимата технологична температура (1150-1300 °С) е необходимо да се определи специфичната електрическа мощност приведена в заготовката  $p_2$  [], необходима за постигане на нужната температурна разлика. В литературата [1, 2] е показана зависимостта  $P_2$  от времето на нагриване (фиг.1). Видът на кривата зависи основно от съотношението на размерите на индуктора и заготовките, от относителната дължина на системата индуктор-метал, а също

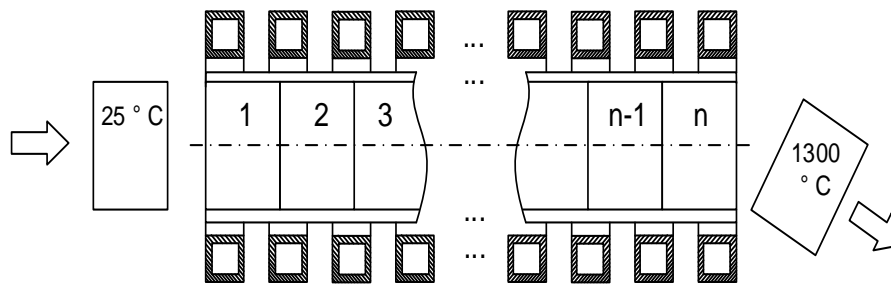
така и от степента на проявление на повърхностния ефект. Точното определяне на специфичната мощност е затруднено от променящите се параметри на системата индуктор-метал по време на нагряването. Това налага използването на числени методи за нейното моделиране.

Определянето на времето за нагряване е свързано с консумираната електрическа мощност, а от там и на себестойността на едно изделие. Оптимизирането на технологичният процес е свързано с оптимизиране на геометричните размери на системата индуктор – детайл, намаляване на топлинните загуби чрез подходяща изолация, намаляване на електрическите загуби и времето за нагряване. Машината за обемно индукционно нагряване (ИН) и принадлежащия и захранващ източник (ЗИ) са оборудвани с индуктори за широка гама на детайли по геометрични размери и обем. При дадена геометрична конфигурация индуктор – детайл, оптимизация на времето за нагряване може да се извърши чрез промяна на честотата и мощността на захранващия източник, като по този начин се осигури оптимално време за нагряване и консумирана мощност, определяща себестойността на технологичната операция. Промяната на честотата е свързано с добавяне или отнемане на кръгови кондензаторни батерии. В [1, 2] са дефинирани критерии за избор на честота за дадена геометрична конфигурация индуктор – детайл, която е оптимална за нагряването.

Цел на доклада е избор на оптимално напрежение на захранване, съобразено с енергийните показатели на ЗИ, чрез моделиране на топлинните и електромагнитните и процеси в определен индуктор за обемно нагряване при зададена производителност.

## ИЗЛОЖЕНИЕ

При индукционно нагряване за ковашко-пресова операция, се използва индуктор от даден тип - R-ITO-100-120 D, - фиг. 2. Индукторът е съставен от три последователно свързани цилиндрични индуктора с дължина 1 м и 13 навивки. Използва се за нагряване на цилиндрични заготовки с радиус 0,1 м и дължина 0,2 м.



Фиг.2. Индуктор за обемно нагряване.

За постигане на заложената производствена програма индуктор е със значителна дължина спрямо нагрявания детайл, като по този начин се осигурява достатъчно време за нагряване на всеки детайл и приемливи енергийни параметри на преобразователя на електрическа енергия – инвертор тип SMK UB 2F2 630/1.5/0.6-R.

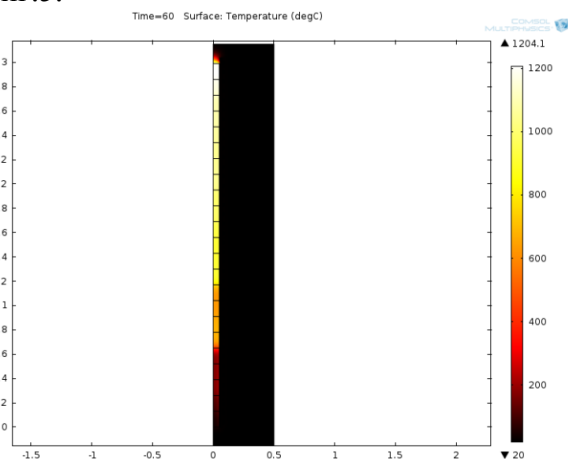
Моделирането на електромагнитните процеси в индуктора и топлинните процеси в заготовките се извършва с програмният продукт Моделирането на топлинни процеси в индуктора се осъществява с програмния продукт COMSOL Multiphysics 4.3.A, използващ метода на крайните елементи.

Необходимите входни параметри са представени в таблица 1.

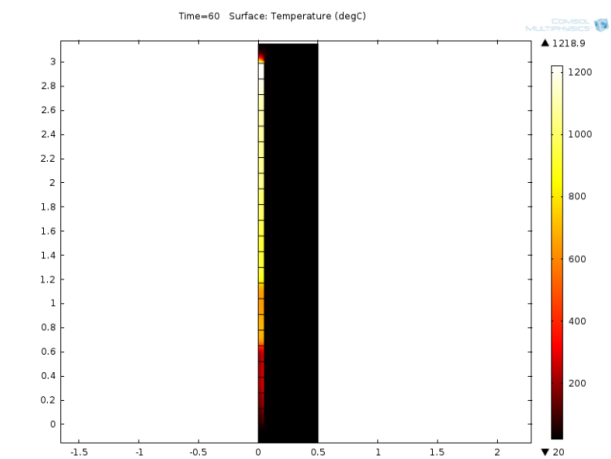
Таблица 1. Входни параметри

Напрежение на индуктора	$U = (300 - 650) \text{ V}$
Честота	$f = 800 \text{ Hz}$
Такт на подаване	$t_0 = 60 \text{ s}$
Магнитна проницаемост	30
Специфично електрическо съпротивление	зададено е аналитично $\rho = \rho_0 \alpha (T - T_{ref}) \Omega \cdot m [5].$
Плътност на детайла.	$7850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}.$
Специфичен топлинен капацитет.	зададен е като функция от температурата [5]
Коефициент на топлопроводност.	зададен е като функция от температурата [5].

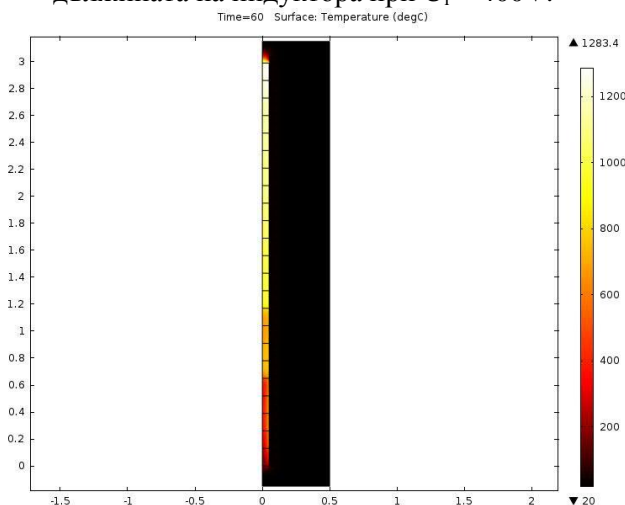
Моделирането е направено при изменението на напрежението на индуктора от 400 до 700 V, при постоянен такт на подаване на заготовките. Резултатите са представени на фиг.2. –фиг.5.



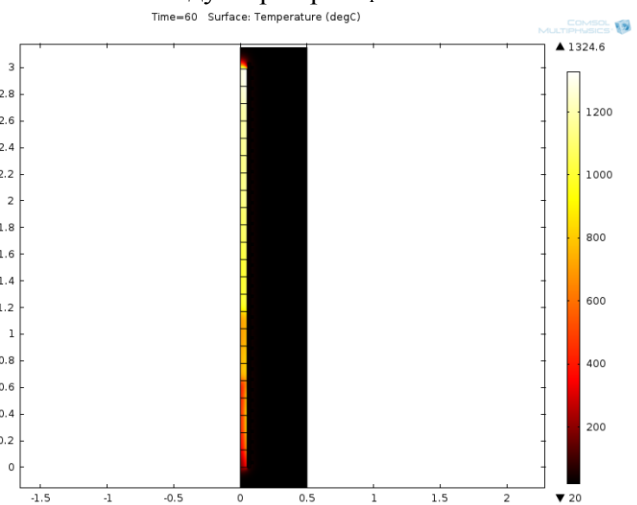
Фиг.3. Разпределение на температурата по дължината на индуктора при  $U_i = 400\text{V}$ .



Фиг.4. Разпределение на температурата по дължината на индуктора при  $U_i = 500\text{V}$ .



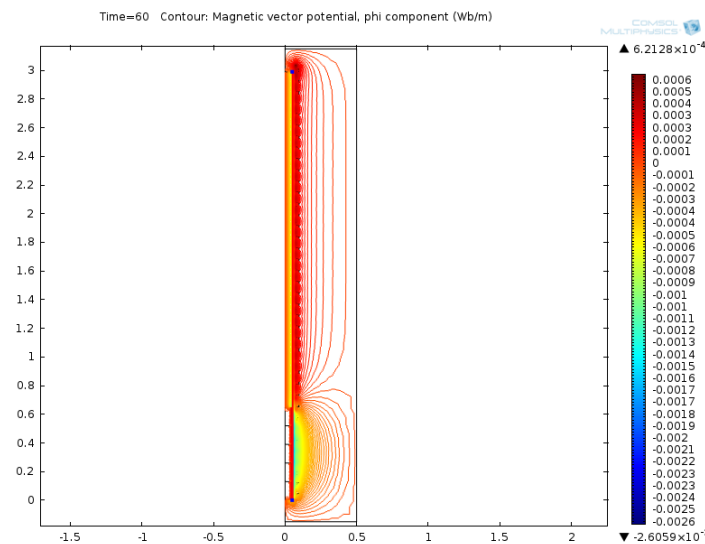
Фиг.5. Разпределение на температурата по дължината на индуктора при  $U_i = 600\text{V}$ .



Фиг.6. Разпределение на температурата по дължината на индуктора при  $U_i = 700\text{V}$ .

От представените резултати от моделирането на индуктора ясно се вижда, че при такт на подаване една минута необходимата технологична температура се достига при напрежение на индуктора  $U_i = 600V$ .

Специфичната електрическа мощност в заготовките се моделира посредством източници на топлина в детайла. Характерни са два етапа ясно различаващи се в процеса на нагряване: преди и след точката на Кюри, в която стоманата губи магнитните си свойства. Източниците на топлина се моделират с посредством вихровите токове индуцирани в детайла и неговите параметри специфично електрическо съпротивление и магнитна проникваемост. Големината им зависи и от броя и геометричните размери на навивките, тъй като се изследва готов индуктор те са константни. Нелинейната зависимост от температурата на параметрите на детайла значително усложнява процеса на моделиране, и налага използването на вариационния подход, като параметрите се въвеждат посредством аналитични функции на температурата. На фиг.7 е представен магнитния векторен потенциал на системата индуктор - детайл по дължината на индуктора.



Фиг.7. Магнитния векторен потенциал на системата индуктор - детайл по дължината на индуктора.

От направеното моделиране на индуктора се вижда ясно, че оптималното време за нагряване е 60 s съобразено с времето за механичните операции, а минималното напрежение при което се достига необходимата технологична температура за коване е 600 V. При тези параметри са изчислени еквивалентните параметри на индуктора [4] таблица 2.

Таблица 2. Еквивалентни параметри на индуктора.

Еквивалентни параметри на индуктора	
r	$27,86 \cdot 10^{-3} \Omega$
x	$69,14 \cdot 10^{-3} \Omega$
L	$14,04 \cdot 10^{-6} H$
z	$74,54 \cdot 10^{-3} \Omega$
P	167 kW
I	1494 A

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В представената публикация са представени резултатите от моделирането на температурно и магнитно поле на дълъг индуктор с детайли за обемно нагряване. От получените резултати е избрано оптимално време за нагряване на заготовките съобразено с енергийните показатели на ЗИ и необходимото технологично време за ковашко-пресовите операции. Резултатите от моделирането се потвърждават от експериментално проведените изследвания.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Немков, В. С., В. Демидович. Теория и расчет устройства индукционного нагрева, Л., Энергоатомиздат, 1988г
2. Слухоцкий, А. Е., Рыскин С. Е., Индукторы для индукционного нагрева, София, 1974.
3. *COMSOL Multiphysics 4.3.a MaterialLibraryUsersGuide.pdf*.
4. Симеонов, М. В., Х. Ибришимов. моделиране и анализ на индуктор за обемно нагряване с диференцирани топлинни зони по дължината му. *Journal of the Technical University of Gabrovo*, Vol. 45'2013, pp. 55 – 58.