

**МОДЕЛИРАНЕ И АНАЛИЗ НА ИНДУКТОР ЗА ОБЕМНО НАГРЯВАНЕ С
ДИФЕРЕНЦИРАНИ ТОПЛИННИ ЗОНИ ПО ДЪЛЖИНАТА МУ****MODELING AND ANALYSIS OF INDUCTOR BY VOLUME HEATING WITH
DIFFERENTIATED THERMAL ZONES IN LENGTH****Минчо Ванев Симеонов***

ТУ-Габрово

Христо Тодоров Ибришимов

ТУ-Габрово

Статията е постъпила на 10.05.2013 г.; приета за отпечатване на 7.06.2013 г.

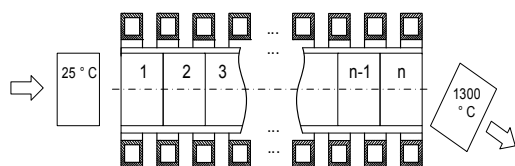
Abstract

In this paper thermal fields that arise in an inductor in the process of volume heating are studied. The equations have been solved by means of the finite elements method, taking into account the characteristic non-linearity of the used material. The analysis was broadened with process modeling by means of COMSOL Multiphysics 4.3.a. The obtained results confirm the reliability of the developed methods compared to the manufacturing and power parameters for the given supply source in regard to power, current and frequency of the practical example.

Keywords: induction heating, electromagnetic fields, thermal fields, mutual inductance, inductor.

ВЪВЕДЕНИЕ

В ковашко-пресовото производство при дълги индуктори за обемно нагряване, се нагряват детайли с обща маса от няколко десетки до 100 – 150 кг. Тези детайли се движат с определена скорост в зависимост от такта на подаване и на изхода технологичната температура е около 1300 °С. Достигането на тази температура за всеки детайл е в продължение на определено време през което температурата на детайла се покачва от 25 до 1300 °С - фиг. 1.



Фиг. 1. Индуктор за обемно нагряване

За изчисление на електромагнитните процеси в подобен индуктор, се използва класическата теория за индукционно нагряване [1, 2]. При тези изчисления температурния режим и в частност температурата, се определя по посока на проникване на магнитното поле в детайла или по сечението на детайла намиращ се в индуктора. Резултатите от температурния анализ и изчисления при индукционно нагряване (ИН), се обвързват с зависимостта на магнитната проницаемост μ и специфичното съпротивление ρ в детайла от изменението на температурата, а това определя електромагнитни параметри в разглеждания индуктор.

При нагряване на стоманени (феромагнитни) детайли в дълъг индуктор за обемно нагряване (фиг. 1) пода-

вани с определен такт, се разграничават температурни зони, в диапазона между 25 и 1300 °С. Тези разграничени температурните зони в един дълъг индуктор се основават следните допускания:

1. Дългият индуктор за обемно нагряване, се разглежда като топлинно изолирана система към околното пространство, с акумулирано високо ниво на топлинна мощност;
2. Топлинните процеси се разглеждат в установен топлинен режим;
3. Приема се, че температурата на всеки отделен детайл е еднаква по неговото сечение.

Електромагнитните параметри в такъв индуктор ще се определят в голяма степен от температурните зони по дължина на системата индуктор – детайли.

За получаването на достоверни резултати при определянето на еквивалентните електромагнитни параметри на тази система е необходимо да се определи дължината на всяка температурна зона по дължина на индуктора. Основните фактори, влияещи за формирането в индуктора на температурни зони по дължина, се определят като: електрически и магнитни параметри на системата дълъг индуктор-феромагнитни детайли; геометрични размери; топлинни изолации; производителност на дадена машина за обемно нагряване.

Подобно разделение на обособени температурни зони по дължината на индуктор се наблюдават в достатъчен брой технологични операции в индукционно обемно нагряване, за да се приеме необходимостта от допълнение в теорията и анализа на електромагнитните изчисления и методики [2, 4].

* Тел.: 066 827 396 ; e-mail: symeon@tugab.bg

Като първоначален етап от анализа на топлинните и впоследствие и електромагнитните параметри, се допуска броя на температурните зони да се ограничи до три, най-пряко свързани с магнитните свойства и еквивалентните параметри на системата индуктор метал.

1. *Студена зона* - от 25 до 500-600 °С. Обхваща ограничен брой детайли започващ от началото на индуктора по дължината му, като в края на температурната зона последният детайл не превишава 600 ÷ 680 °С. В тази зона магнитната проницаемост μ и специфичното съпротивление ρ на повърхността се определят от физичните свойства на нагревания стоманен детайл.

2. *Междинна зона* – от 650 до 850 °С. Температурата на детайлите е непосредствено преди точката на Кюри. Обхваща ограничен брой детайли по дължината на индуктора, като в края на температурната зона последният детайл не превишава 800 ÷ 850 °С. Електрическите и магнитните режими определят значими изменения на магнитната проницаемост μ и специфичното съпротивление ρ , които са анализирани и известни [1,2].

3. *Гореца зона* – от 850 до 1300 °С. Обхваща ограничен брой детайли до края на индуктора, като в тази зона се достига технологичната температура за ковашко пресова обработка на детайлите около 1300 °С. Магнитната проницаемост μ спада рязко и достига до 1. Специфичното съпротивление ρ е променливо в зависимост от температурата.

Цел на доклада е анализ и моделиране на електромагнитните и топлинните процеси в индуктор за обемно нагряване от даден тип - R-ITO-630/1-A-L, с наличие на диференцирани температурни зони и домейни на магнитното поле в него.

ИЗЛОЖЕНИЕ

При индукционно нагряване за ковашко-пресова операция, се използва индуктор от даден тип - R-ITO-630/1-A-L, - 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 0,15 м.

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

Описаната система е един от възможните примери, при които резултантното магнитно поле и еквивалентните електромагнитни параметри на системата индуктор-детайл, ще се формират от зони, с различаващи се параметри на магнитното поле в тях.

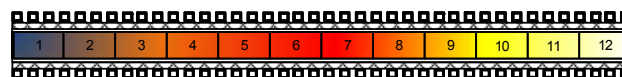
Необходимите входни параметри за моделирането са представени в табл. 1.

Таблица 1. Входни параметри

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

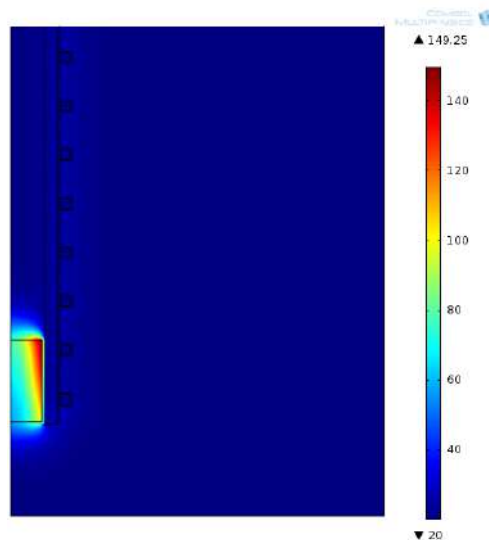
Моделирането на топлинни процеси в индуктора се осъществява с програмния продукт COMSOL Multiphysics 4.3.A, използващ метода на крайните елементи.

В зависимост от геометричните размери на нагреваните детайли, дължината на индуктора, такта на подаване и специфичната електрическа мощност p_0 [W/m²] е моделиран топлинния режим и температурата на образувания стоманен цилиндър в индуктора по неговата дължина. Могат да се разграничат температурни зони с разграничени относително постоянни температури – фиг. 2.

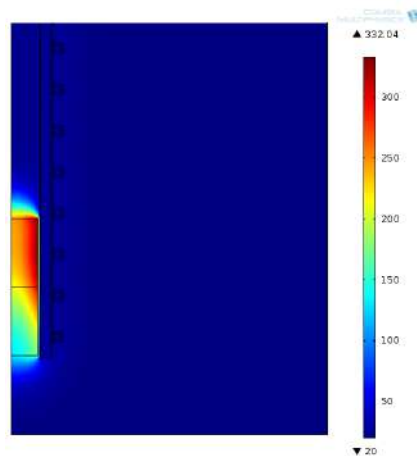


Фиг. 2. Индуктор с обособени температурни зони

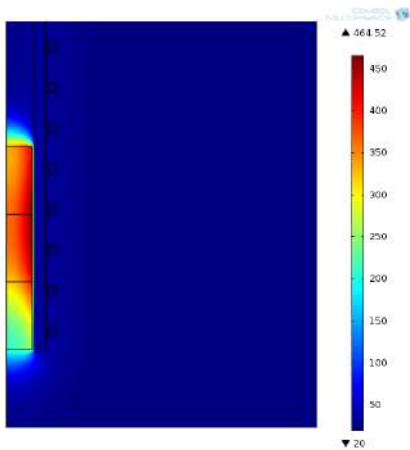
Показани са първите три последователни такта през 60 s на подаване на стоманени детайли и резултатите от моделирането на топлинното поле и температура в детайлите (фиг.3 – фиг. 5).



Фиг. 3 Разпределение на температурата в нагреваните детайли след 60 s

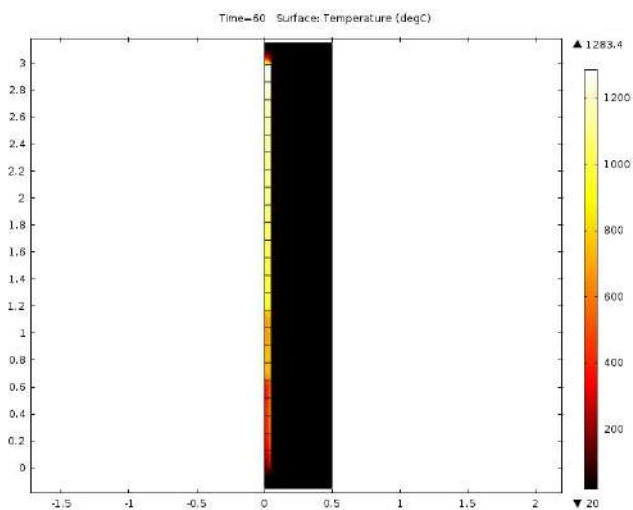


Фиг.4 Разпределение на температурата в нагреваните детайли след 120 s.



Фиг. 5 Разпределение на температурата в нагряваните детайли след 180 s

Детайлите в зависимост от такта на подаване последователно се придвижват по дължината на индуктора. Крайният резултат от моделирането след 15 такта е показан на фиг. 6.



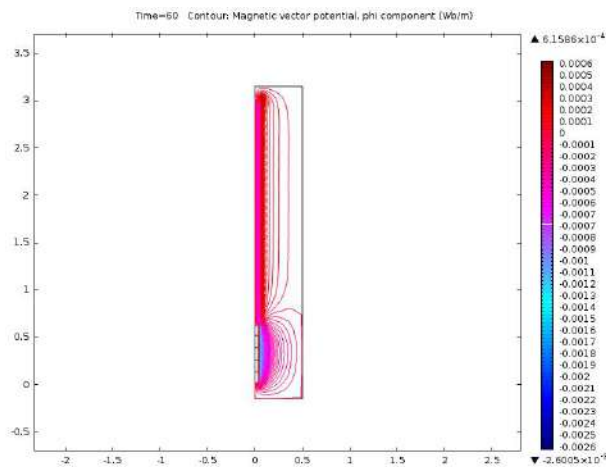
Фиг. 6. Моделирано температурно поле по дължината на индуктора

Достигането на технологична температура около 1250 °C е заложено за време на нагриване 660÷720 s. Температурата дефинирана като точка на Кюри, се достига за приблизително 1/6 от общото време, където са очакваните промени в магнитните свойства на детайла.

Както беше отбелязано по горе по дължината на индуктора се обособяват температурни зони, които се доказват с направеното моделиране.

Наличието на тези температурни зони определя развитието на електромагнитните процеси в тези обособените зони. На този етап от развитие на предлаганата методика [1, 2] се приемат две зони - студена зона (зона I) и гореща зона (зона II), разделени по отношението разлики в температурите и по рязкото изменение на магнитната проницаемост. Моделирането на електромагнитните процеси се извършва с програмния продукт COMSOL Multiphysics 4.3.A. Задават се параметри, които са обвързани с температурната зависимост на магнитната проницаемост μ и специфичното съпротивление ρ . Получена е графика на магнитния векторен потенциал - фиг. 7. Първия магнитен домейн обхваща

първа температурна зона, в която магнитната проницаемост е $\mu > 1$. Вторият магнитен домейн обхваща магнитното поле от II зона, приема се магнитна проницаемост $\mu \approx 1$.



Фиг.7. Магнитен векторен потенциал на система индуктор разпределен по дължината на индуктора.

Еквивалентните параметри на тези диференцирани зони от индуктора по магнитни домейни, доказани и с моделирането на обекта ще се определят по класическата теория на индукционното нагриване [1, 2].

Изчислението на електромагнитните параметри на индуктора се представя като задача с постоянни параметри на магнитното поле по обособени магнитни домейни и се извършва в следната последователност:

1. Изчисление на еквивалентните параметри на системата индуктор –детайл в I домейн.
2. Изчисляване на еквивалентните параметри на системата индуктор –детайл II домейн;
3. Обединение на предходните две задачи с отчитане на електрическата и магнитната връзка между тях и изчисление на еквивалентните параметри на индуктор с диференцираните домейни на магнитно поле в него.

При изчислението се правят следните допускания:

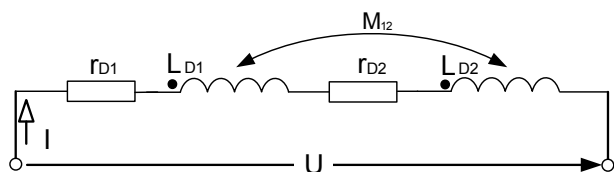
1. В двата магнитни домейна магнитната проницаемост е постоянна;
2. Дължината на магнитните домейни се определя от такта на подаване на детайлите и специфичната мощност в тях.

За изчислението на еквивалентните параметри в двата диференцирани магнитни домейни се използват изчисленията на индуктор в „студен режим“ и „горещ“ режим [2]. Резултатите са получени за еквивалентните параметри са представени в таблица 2.

Таблица 2. Еквивалентни параметри

Еквивалентни параметри	I зона Студен режим (I домейн)	II зона Горещ режим (II домейн)
r_{ei}	$18,92 \cdot 10^{-3} \Omega$	$8,94 \cdot 10^{-3} \Omega$
X_{ei}	$27,19 \cdot 10^{-3} \Omega$	$42,03 \cdot 10^{-3} \Omega$
L_{Di}	$5,41 \cdot 10^{-6} H$	$8,36 \cdot 10^{-6} H$
Z	$33,8 \cdot 10^{-3} \Omega$	$43,04 \cdot 10^{-3} \Omega$

Следващата стъпка съгласно представената по-горе методика на решение на задачата е обединяване на двата домейна и отчитане на взаимната индуктивност между тях. За целта се използва заместващата схема, показана на фиг. 8.



Фиг. 8. Еквивалентна заместваща схема на индуктор с обособени зони по електромагнитни параметри.

$$U = (r_{D1} + r_{D2})I + (L_{D1} + L_{D2} + 2M_{12}) \frac{dI}{dt} \quad (1)$$

където: r_{D1} , r_{D2} , L_{D1} , L_{D2} - еквивалентни активни съпротивления и индуктивности в двата домейна; M_{12} , M_{23} - взаимни индуктивности между двата домейна.

За определяне на взаимната индуктивност M_{12} се прилага принципа на взаимно заменящи се дължини в соленоид [3].

$$M_{12} = \frac{\pi}{8} \mu_0 w W \frac{d^2}{a_1 a_2} [(a_1 + a_2) K_{a12} - a_1 K_{a1} - a_2 K_{a2}] \quad (2)$$

където: μ_0 - магнитна проницаемост на вакуума, числено равна на $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m, w , W - брой навивки на двата домейна; d - диаметър на индуктора; a_1 , a_2 - дължини на I и II домейн [m]; K_{a1} , K_{a12} , K_{a2} - коефициенти, стойностите на които зависят от отношението $\alpha = a_i/d$, където a_i - дължина на съответния домейн в [m]; d е диаметър на индуктора [m]. За конкретния случай $K_{a1} = 0,94$, $K_{a12} = 0,98$, $K_{a2} = 0,97$.

По представената методика е изчислена взаимната индуктивност $M_{12} = 0,117 \cdot 10^{-6}$ [H].

Заклучителният етап от предлаганата методика е изчисление на енергийните параметри на индуктора

при зададено напрежение и работна честота и време за нагряване на един детайл. Резултатите от изчисленията на еквивалентните параметри, по представената методика, са показани в таблица 3.

Таблица 3. Еквивалентни параметри на индуктора.

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

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представената публикация са представени резултатите за температурно и магнитно моделиране на дълъг индуктор с детайли за обемно нагряване.

1. Предлага се допълнение в теорията за индукционно нагряване и методика за изчисление на електромагнитни параметри на система индуктор - детайл с обособени температурни зони и магнитни домейни по дължината на индуктор за обемно нагряване;
2. Работата по анализа и изчисленията е ограничена до две температурни зони и магнитни домейна в дългите индуктори.

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]. Калантаров П. Л., Цейтлин Л. А. Расчет индуктивностей. Л., Энергия, 1970.
- [4]. Simeonov M., H. Ibrishimov, P. Prodanov „Modeling and analysis of an inductor – piece system with differentiated domains of the electromagnetic field in the inductor” PCIM Europe 2013, Paper No PP17, pp1-5, Nurnberg, Germany, 13-15 May 2013.
- [5]. COMSOL Multiphysics 4.3.a MaterialLibraryUsersGuide.pdf.