

ОПРЕДЕЛЯНЕ ПЪЛТНОСТТА НА ВЪЗБУЖДАНИЯ ТОК ПРИ ДВУМЕРЕН ЧИСЛЕН АНАЛИЗ НА ИНДУКЦИОННИ НАГРЕВАТЕЛИ

Павел Минчев, Марин Димитров

Институт по металоизнане – Българска академия на науките

Двумерният числен анализ на електромагнитното поле в индукционни нагреватели, захранвани от електронни преобразователи на честота, най-често се осъществява с помощта на две изчислителни схеми. Първата от тях се характеризира с допускането за равномерно разпределение на възбуджения ток в хомогенни области [1,2,3]. При втората пълтността на възбуджения ток се определя с отчитане на реалната геометрия на индуктора и реалните физически свойства на материала, от които е изгответ [4,5,6]. По този начин точността се повишава, но броят на възловите точки нараства.

В настоящата работа е направен опит да се определят рационалните граници на приложение на двете изчислителни схеми чрез анализ на конкретни електромагнитни системи по метода на крайните елементи.

ФОРМУЛИРОВКА НА ЗАДАЧАТА

Изследването се базира на следното уравнение на векторния магнитен потенциал A :

$$\text{rot} \left(\frac{1}{\mu} \text{rot} A \right) + j\omega\sigma A = J_s \quad (1)$$

Тук σ е електропроводимост, μ – магнитна проницаемост, J_s – пълтност на възбуджения ток, j – имагинарната единица и $\omega = 2\pi f$, където f е честотата.

Уравнение (1) се дискретизира в мрежа от крайни елементи, а след прилагане метода на Galerkin и съответните гранични условия се привежда към система алгебрични уравнения с постоянни коефициенти [3,4].

При първата от разглежданите изчислителни схеми се приема:

$$J_s = J_{si} = \text{const}, \quad i = 1, 2 \dots n, \quad (2)$$

Тук n е броят на секциите на индуктора.

За областите, в които $J_s \neq 0$ се задава $\sigma = 0$ и $\mu = \mu_0$, където μ_0 е магнитната проницаемост на вакуума. При това ограничение численият анализ не решава задачата за определяне загубите в индуктора и се налага активните съпротивления на всяка секция r_{lu} да се изчисляват по приблизителни формули. За цилиндричен индуктор, независимо от сечението на тръбата от която е изгoten, се използва съотношението [7]:

$$r_{lu} \approx \frac{\pi D_{lu}}{a_{lu}} w^2 \frac{\rho_l}{\Delta_l} \quad (3)$$

където ρ_l е специфичното електросъпротивление на материала на индуктора, D_{lu} и a_{lu} са съответно вътрешният диаметър и височината на секцията, Δ_l е електромагнитната дълбочина на проникване. Прието е, че $\Delta_l < d$, където d е дебелината на стената на медната тръба.

Напълностите J_s се коригират до достигане предварително зададени параметри - напрежения или консумирана мощност [2].

При втората изчислителна схема J_s се определя посредством напрежението U , приложено върху всяка навивка на индуктора с помощта на зависимостта

$$J_s = U\sigma / L \quad (4)$$

Тук L е дължината на токовата линия. При ососиметричен индуктор $L = 2\pi r$, където r е текущият радиус.

Навивковите напрежения се коригират с оглед изравняване изчислените значения на токовете в навивките за всяка една от секциите на индуктора [6].

Активното съпротивление на една секция се изчислява по формулата:

$$r_{lu} = P_l / I_l^2 \quad (5)$$

където P_l и I_l са съответно активните загуби и токът в секцията, получени в резултат на числениния анализ.

Препоръчителни граници на приложение на двете схеми могат да се определят като се изследват електромагнитни системи от един и същи вид, но с различни геометрични съотношения. Необходимо е също така да се отчете

влиянието на екраниращите конструктивни елементи. Когато значенията на r_{lb} , изчислени по формули (3) и (5) са близки помежду си, достатъчно е да се използва първата изчислителна схема, а при съществени различия трябва да се приложи втората схема.

ИЗСЛЕДВАНЕ НА ОСОСИМЕТРИЧНИ СРЕДНОЧЕСТОТНИ НАГРЕВАТЕЛИ С ЦИЛИНДРИЧЕН ИНДУКТОР

Ососиметричните средночестотни идукционни нагреватели с цилиндричен индуктор са широко разпространени. Такива са голяма част от устроенствата за обемно нагряване, закалка, дифузионно заваряване, идукционните топилни пещи и др.

На фиг. 1 е представен чертж на секция от индуктор за обемно нагряване със следните характеристики: брой на навивките 28, като всяка навивка се съдържа два успоредни проводника, специфични електросяъпротивления на материалите на индуктора и нагряваното тяло съответно $\rho_1 = 2 \cdot 10^{-8} \Omega m$ и $\rho_2 = 1,15 \cdot 10^{-6} \Omega m$, работната честота е $f = 10000 Hz$. Голямата относителна дължина на индуктора позволява нагревателят да се разглежда като отрязък от безкрайно дълга система, а областта на интегриране при численния анализ да се ограничи между равнините Γ_1 и Γ_2 , показани на фигурата. Резултатите от изчислението на r_{lb} , както и грешката от прилагането на приближителната формула (3) са приведени в Таблица 1.

Фиг. 2 представлява схема на идукционна топилна пещ с вместимост 10 kg. Индукторът на пещта е едносекционен и съдържа 10 навивки, работната честота е 3300 Hz. Освен това $\rho_1 = 2 \cdot 10^{-8} \Omega m$ и $\rho_2 = 1,3 \cdot 10^{-6} \Omega m$. В конструкцията на пещта могат да бъдат включени допълнителни елементи, показани на фигурата с прекъсната линия - електромагнитен скрин от метален лист или магнитопроводи от силициева ламарина (магнитетен скрин).

На фиг. 3 е показан идукционен нагревател с относително къс индуктор. Значенията на ρ_1, ρ_2 и f са същите както в предишния пример. В Таблица 1 са представени резултатите от изчислението на r_{lb} за системата от фиг. 2 и за два варианта на системата от фиг. 3.

Таблица 1. Резултати от изчислението на активното спротивление на индуктора r_u , [Ω] на индукционни нагреватели с различни геометрични и конструктивни характеристики.

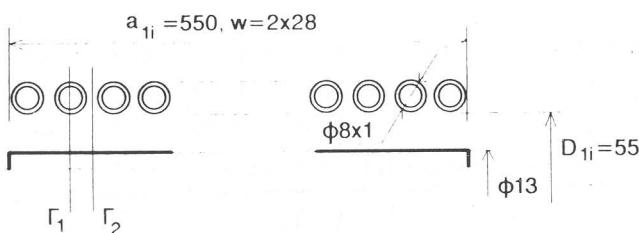
Геометрични и конструктивни характеристики	Определяне на r_{lu} с помощта на формула (3), използвана при числен анализ по първата изчислителна схема	Числен анализ по втората изчислителна схема и определяне на r_{lu} по формула (5)	Грешка от използване на формула (3), %
Фиг. 1: $a_u / D_u = 10$; $w = 2 \times 28$	0,0069	0,0071	-2,8
Фиг. 2 : $a_u / D_u = 1,04$, $w = 10$ -неекраниран индуктор -магнитен экран -електромагнитен скрин	0,00487 0,00487 0,00487	0,00444 0,00548 0,00386	9,7 -11,1 26,2
Фиг. 3 $a_u / D_u = 0,621$, $w = 6$ $a_u / D_u = 0,2$, $w = 2$	0,00147 0,00051	0,00125 0,00027	17,6 89,6

ИЗВОДИ

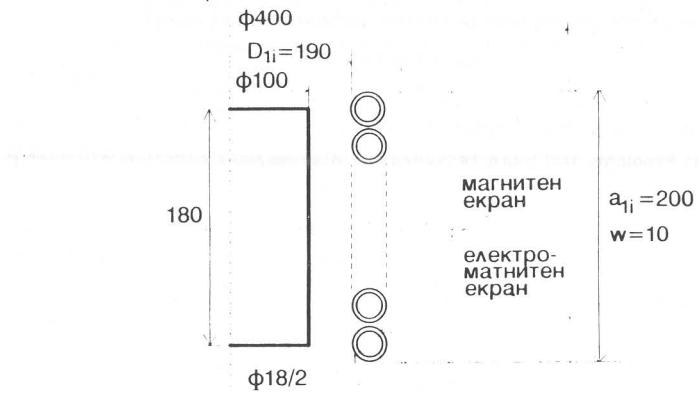
Анализът на числните резултати показва, че с намаляване на относителната височина на индуктора и броя на навивките грешката от прилагане на формула (3) се увеличава. Използването на първата от обсъжданите тук изчислителни схеми е възможно за нагреватели с относителна дължина на индуктора по-голяма от 1, както и при $a_u / D_u \approx 1$ и неекраниран или магнитно екраниран индуктор. В останалите случаи е необходимо да се прилага втората схема. Трябва да се отбележи, че при силно разредна намотка на индуктора прилагането на първата изчислителна схема може да доведе до съществени грешки, независимо от геометричните съотношения и броя на навивките.

ЛИТЕРАТУРА

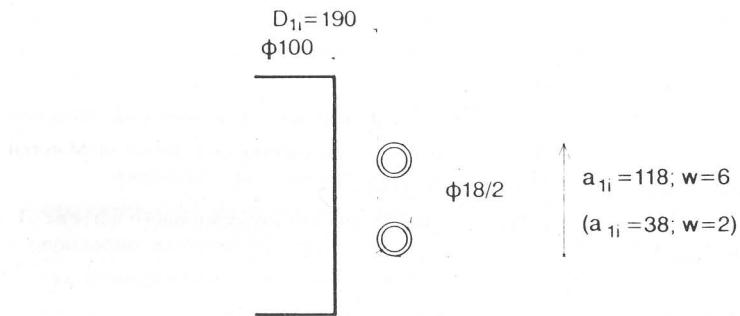
1. Donea J., S.Giuliani, A.Philipe. Finite Elements in the Solution of Electromagnetic Induction Problems. Int. Journ. of Numerical Methods in Engineering. Vol.8, 1974, 359-367.
2. Димитров М., А. Кръстева. Численный анализ параметров монофазных и трехфазных систем индукционного нагрева. Международный семинар "Математическое моделирование в электротермии", Ленинград, 1989, доклад № 2.7.
3. Кръстева А., М.Димитров, А.Георгиев, С.Захариев. Математично моделиране по метода на крайните елементи на индукционен нагревател със сложна геометрия и с нелинейни свойства на нагревания материал. Електропромишленост и приборостроение, No 6, 1987, 14-17.
4. Preis K., K.Stoenger, K.R.Richter. Calculation of eddy current losses in air coil by finite element method. IEEE Trans. on Magnetics, Vol. Mag - 18, No 6, Nov. 1982.
5. Минчев П., М. Димитров. Относно избора на крайни елементи при двумерен числен на индукционни нагреватели. Втора национална научно-приложна конференция с международно участие "Електронна техника ET'93", Созопол. Сборник доклади, Том 2, 1993, 175-179.
6. Mintchev P., M.Dimitrov, S.Balinov. Calculation of axisymmetric induction heaters with consideration of the eddy currents in the exciting coil. Jurnal of Material Science and Technology, Vol. 2, 1994, No 1, 54-61.
7. Слухоцкий А.Е., С.Е.Рыскин. Индукторы для индукционного нагрева. Л. "Энергия", 1974.



Фиг. 1



Фиг. 2



Фиг. 3