

## ЧИСЛЕН АНАЛИЗ НА ИНДУКЦИОНЕН НАГРЕВАТЕЛ СЪС СЪПЬКОВО ПРЕМЕСТВАНЕ НА ДЕТАЙЛИТЕ

ст. н. с. ктн Марин А. Димитров – Българска Академия на Науките,  
Институт по Металознание  
доц. ктн Анастасия Кръстева – Технически Университет –  
София

Режимите на работа на електронните преобразуватели на честота са непосредствено свързани с техническите изисквания на индукционните нагреватели, които захранват.

В настоящата работа се предлага числен анализ на методичен индукционен нагревател със стъпково преместване на детайлите. Използва се числен анализ по метода на крайните разлики (МКР) и метода на крайните елементи (МКЕ).

Алгоритъм за изчисление на електрическите параметри на  
многосекционен индуктор [1]

Структурата на алгоритъма се характеризира с наличие на вложени цикли. Напряженията и токовете се изчисляват за едновременски секции с последващо приеждане към реалния брой навивки.

Всяка стъпка от първия цикъл включва изчисление на възловите значения на векторния магнитен потенциал  $A_j$ , като може да се използва, както МКР [2], така и МКЕ [3]. Определят се напряженията върху секциите на индуктора  $U_p$ ,  $p = 1, 2, \dots, M_c$ , където  $M_c$  е броят на секциите, а също отношенията :

$$(1) \quad R_p = U_p / U_1, \quad p = 2, 3, \dots, M_c.$$

Коригират се текущите значения на плътността на тока в секциите на индуктора с номера по-големи от 1 по формулата :

$$(2) \quad \delta_p^{(m+1)} = \delta_p^{(m)} \cdot [1 + u \cdot K], \quad K = R_p^* / R_p, \quad p = 2, 3, \dots, M_c, \quad \text{където } m \text{ е номер на стъпката, } R_p^* \text{ е предварително зададеното значение на } R_p, \quad u \text{ - коефициент на релаксация.}$$

Всяка стъпка от втория цикъл обхваща целия първи цикъл. Освен това се коригират значенията на магнитната проницаемост  $\mu$  за всички клетки (елементи) с нелинейни магнитни свойства по формулата :

$$(3) \quad \mu^{(m+1)} = [\mu(B) - \mu^{(m)}] \cdot u + \mu^{(m)},$$

където  $\mu(B)$  са значенията на  $\mu$ , съответстващи на текущите значения на магнитната индукция  $B$ .

Всяка стъпка на третия цикъл включва предишния цикъл, а също така корекция на плътностите на тока във всички секции:

$$(4) \quad \delta_p^{(m+1)} = \delta_p^{(m)} \cdot [1 + u \cdot (K - 1)], \quad p = 1, 2, 3, \dots, M_c.$$

Тук  $k = \sqrt{P / P^*}$  или  $k = |U_1^*| / |U_1|$ , където  $P$  е консумираната мощност,  $U_1$  - напрежение върху първата секция,  $P^*$  и  $U_1^*$  - предварително зададени значения на  $P$  и на  $U_1$ .

От първия и третия цикъл се излиза когато  $K$  стане достатъчно близко до 1, а от втория - когато  $\mu^{(m)}$  стане достатъчно близко до  $\mu(B)$ .

#### Методика за проектиране на индукционен нагревател със стъпково преместване на детайлите

Методиката се основава на приведенния алгоритъм за изчисление на електрическите параметри на многосекционен индуктор. Илюстрирана е с оразмеряване на деустьвов нагревател, който е показан на фиг. 1. Геометричните размери на секциите на индуктора се определят от размерите на нагревания детайл, а също така от конструкцията на топлоизолацията. Преместването на детайла се извършва циклично, като времето на цикъла зависи от температурата на нагреване, материала, в случая въглеродна стомана и мощността. В много случаи цялото време за нагреване, броят на секциите и общата дължина на индуктора се определят от максимално допустимата разлика между температурите по оста и на повърхността на детайла. Прието е, че на позиция 1 се извършва нагреване от стайна температура до загуба на магнитните свойства или  $\approx 760^\circ\text{C}$ . На позиция 2 се достига крайната температура  $t_2$ . Като са използвани данни от [4] е

определено топлосъдържанието  $Q$  на детайла в края на цикъла на позиция 1,  $Q_1 = 514 \text{ kJ/kg}$ . В таблица 1 са представени значенията на  $Q$  в края на цикъла на позиция 2,  $Q_2$ , в зависимост от  $t_2$ , количеството топлина, възприемано само на тази позиция  $Q = Q_2 - Q_1$  и отношението  $Q / Q_1$ .

Таблица 1.

$t_2, ^\circ\text{C}$	850	900	950	1000	1100	1200	1300
$Q_2, \text{kJ}$	597	633	664	695	760	829	898
$Q=Q_2-Q_1, \text{kJ}$	83	119	150	181	246	315	384
$Q / Q_1$	0,161	0,231	0,292	0,352	0,478	0,613	0,747

Електрическото изчисление на нагревателя се извършва при следните изходни данни:

- Номинална мощност  $P_H = 50 \text{ kW}$ ;
- Работна честота  $f = 10 \text{ kHz}$ ;
- Номинално изходно напрежение на захранващия преобразувател

$$U_H = 400 \div 450 \text{ V};$$

- Електрическа проводимост на материала на нагревания детайл – средните значения за времето на цикъла : за позиция 1  $\rho_1 = 1,67 \cdot 10^6 (\Omega\text{m})^{-1}$ , за позиция 2  $\rho_2 = 0,87 \cdot 10^6 (\Omega\text{m})^{-1}$ .

На позиция 1 материалът на нагревания детайл е магнитен. Използва се зависимост между действащите значения на първите хармоници на магнитната индукция  $B$  и магнитната напрегнатост  $H$ . Тази зависимост може да бъде получена от основната крива на намагнитване по метода, описана в [1] и [5].

Свързането на двете секции на индуктора е паралелно. Задават се няколко значения за отношението между броя на навивките на втората и първата секция  $n_2 / n_1$ . Това става като на параметъра  $R_p$  се приписват стойности

$$(5) \quad R_p = \frac{n_1}{n_2}, \quad p = 2.$$

В таблица 2 са показани някои резултати от изчислениято, а именно : отношението между полезните мощности във втората и първата

секции  $P_{n2} / P_{n1}$  в зависимост от  $n_2 / n_1$  и при  $P^* = P_N = 50 \text{ kW}$ . Численото моделиране е осъществено по МКР.

Таблица 2.

$n_2 / n_1$	0,3	0,35	0,4	0,45	0,475	0,5
$P_{n2} / P_{n1}$	0,837	0,671	0,544	0,445	0,402	0,368

Очевидно е, че трябва да има съответствие между отношенията  $Q / Q_1$  от таблица 1 и  $P_{n2} / P_{n1}$  от таблица 2. Съвместното използване на данните от двете таблици може да послужи за определяне на отношението  $n_2 / n_1$ . Например при крайна температура на нагряване  $t_2 = 1000^\circ\text{C}$  трябва да се избере  $n_2 / n_1 = 0,5$ , тъй като

$$\frac{Q}{Q_1} \bigg|_{t_2=1000^\circ\text{C}} \approx \frac{P_{n2}}{P_{n1}} \bigg|_{n_2/n_1=0,5}$$

Ако  $t_2 = 1100^\circ\text{C}$ , то  $n_2 / n_1$  трябва да се избере в интервала  $0,4 \div 0,45$ . На фиг. 2 е показано графично определяне на  $n_2 / n_1$  при различни крайни температури на нагряване. В таблица 3 са приведени подробни данни от изчислението за  $t_2 = 1000^\circ\text{C}$  и съответно  $n_2 / n_1 = 0,5$ .

Таблица 3.

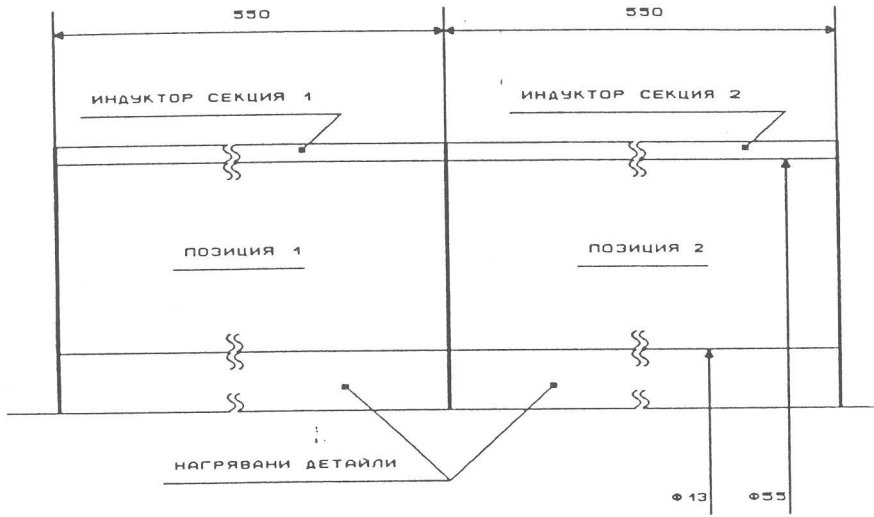
	Секция 1	Секция 2	Общо
Брой на навивките $n_i$	56	28	84
Напрежение $U_i$ , V	407	407	407
Полезна мощност $P_{n,i}$ , kW	13,8	5,07	18,87
Загуби в индуктора $P_{n,i}$ , kW	4,0	25,8	29,8
Консумирана активна мощност $P_i$ , kW	17,8	30,87	48,67
Електрически в.п.д.	0,775	0,164	0,388
Реактивна мощност $P_{qi}$ , kVA	152	783	935
Прод. на цикъла $\tau$ , sec	21	21	21

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

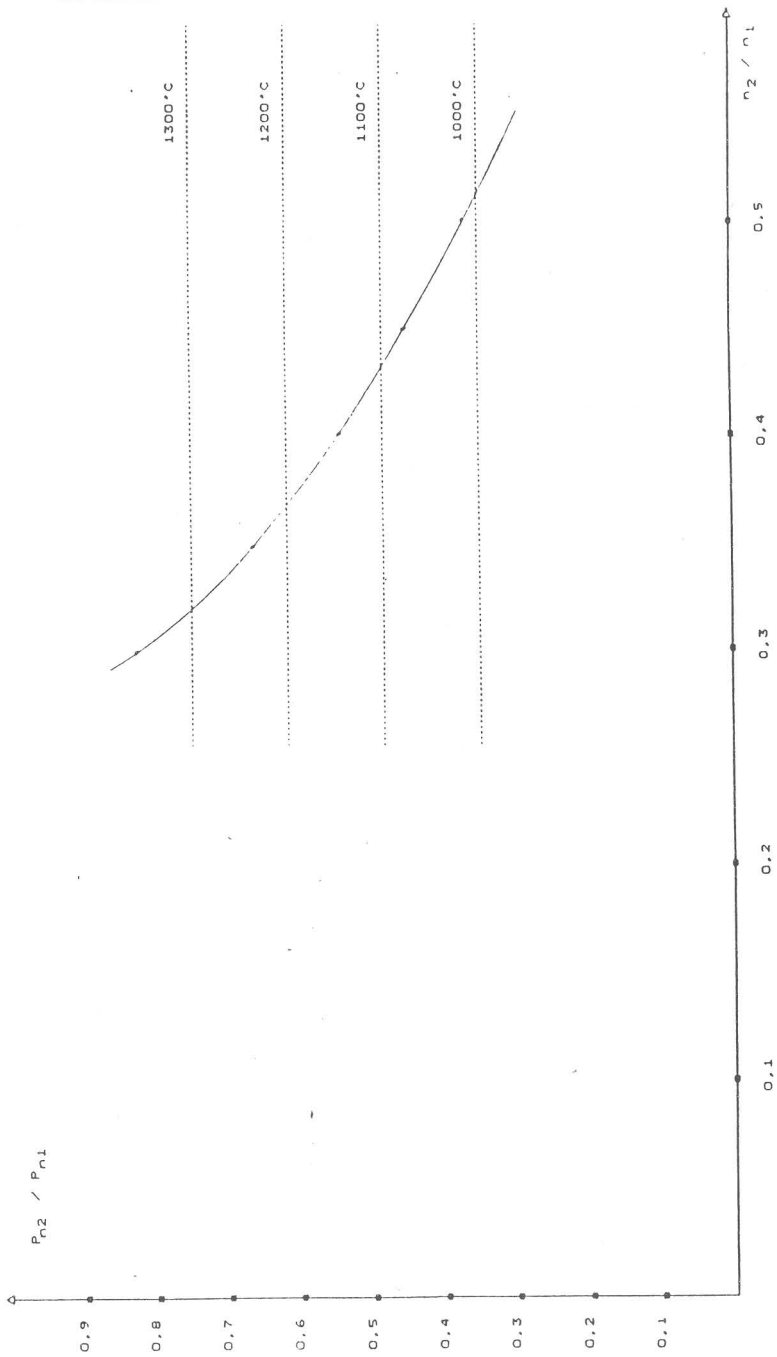
Представена е методика за проектиране на индукционен нагревател със стъпково преместване на детайлите, базирана на алгоритъм за изчисление на електрическите параметри на многосекционен индуктор по МКР или МКЕ. Методиката е разработена за двусекционен индуктор, но може да бъде разширена за нагревател с три и повече позиции на обработвания детайл. Използването ѝ съкращава времето за проектиране и свързаните с него материални разходи.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Димитров, И., А. Кръстева. Числен анализ параметров монофазних и трехфазних систем индукционного нагрева. Международный семинар "Математическое моделирование в электротермии", Ленинград, 1989г., доклад # 2.7.
2. Кръстева, А., И. Малджиев, М. Димитров. Анализ на параметрите на индукционни нагреватели по метода на крайните разлики. Национална научно-техническа конференция ЕЛТЕРМАТ'87, 28-30 май, 1987г.
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, # 6, 1987г.
4. Материалы для электротермических установок. Под ред. М. Б. Гутмана, Москва, Энергоатомиздат, 1987г.
5. Минчев, П., С. Бабинов, М. Димитров, Х. Христов. Изчисляване на разпределението на електромагнитното поле в асиметрични магнетохидродинамични устройства с помощта на метода на крайните разлики. Техническа мисъл, 1990г., # 2, стр. 99-104.



ФИГ. 1.



Фиг. 2