

ПРОЕКТИРАНЕ НА ИНДУКТОР ЗА НАГРЯВАНЕ НА ФЛУИДИ

Даниела Марева, Димитър Юдов, Емил Марев
Бургаски свободен университет

DESIGN OF THE INDUCTOR OF INDUCTION HEATING OF FLUIDS

Daniela Mareva , Dimitar Iudov, Emil Marev
Burgas Free University

Abstract: *In heating of fluids used this principle - eddy currents inducing in the metal tube or core with special form, located inside the nonmetallic piping. Transform this high frequency magnetic field to heat. This heat is given to the selected fluid and heated to the required temperature, a process that is adjusted quickly and precisely. The realized method for determining the design features of the parameters of the water container, electrical and magnetic parameters of the inductor and determine the number of turns it*

Key words: *heating fluids, inductor.*

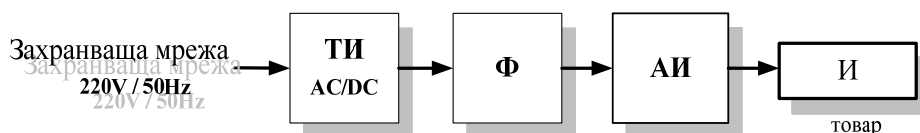
Превръщане на електрическата енергия в електромагнитна и използването и за нагриване на флуиди е известно отдавна.

Индукционното нагриване е безконтактен метод. Генерира се топлина в повърхностния слой на магнитнопроводим материал (метал). Това се дължи на загубите от вихрови токове в работния детайл, които се получават от променливо магнитно поле с висока честота. Това поле се произвежда от бобина-индуктор, захранвана от високочестен инвертор, реализиран с мощни ключови полупроводникови елементи MOS или IGBT. Това е един подходящ подход за индукционно нагриване в процесите за получаване на електрическа топлина и обработка, поради голямата си достъпност (несложност на схемните решения), точност при поддържането на температурата, гъвкавост, чистота на процеса, бързина на реакцията на регулиране, безопасност на технологията, компактност по размер на устройството и лекота при управление [4].

Бобина - индуктор е навита от немагнитен (меден) проводник, който се увива около работния детайл или е поставен успоредно на работната повърхност, която ще се нагрива. Там се преобразува високочестотното електрическо във високочестотното магнитно поле.

При нагриването на флуиди се използва този принцип – вихрови токове, индуциращи се в метална тръба. Тази топлина се отдава на избрания флуид и го подгрива до необходимата температура, като този процес може да се регулира бързо и прецизно.

Блокова схема на система за индукционно нагряване на флуиди с използването на високочестотен инвертор, има вида:



Фиг. 1. Блокова схема на система за индукционно нагряване

Променливото мрежово напрежение се превръща в изправено напрежение, посредством безтрансформаторен токоизправител (ТИ), изглажда се от филтър (Ф) и се превръща във високочестотно напрежение от автономния инвертор (АИ). Индукторът (И) превръща високочестотно напрежение във високочестотно магнитно поле, което индутира токове на Фуко в металната тръба.

Важен елемент в разглежданата схема е индуктора, който превръща електрическата енергия от инвертора в електромагнитна и от там в топлинна.

Предмет на настоящата работа е разглеждането, анализиране и създаване на методика за проектирането на индуктор за индукционно нагряване на флуиди с висока честота.

От обзора [1] е показано голямото разнообразие на различни индуктори.

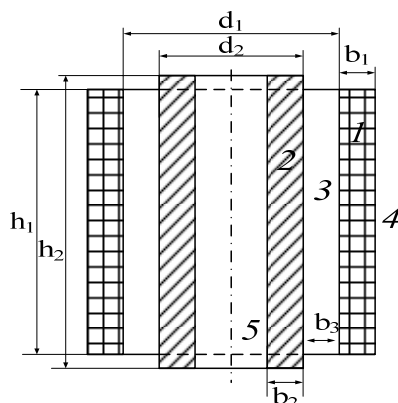
Въпросът за проектиране на индуктора е важен и нелесно реализуем.

Всички индуктори прилагани за нагряване на флуиди си приличат по това, че основната част е бобина, непосредствено свързана към инвертора с товар, който представлява сърцевина /тръба/ от феромагнитен материал с различна форма и размери.

Класически правилно е методиката за проектиране да се разглежда за най-опростена форма, която с определени допускания и корекции може да се принесе и на други форми.

На фиг. 2 е показан чертеж на класически индуктор приложим за нагряване на флуиди – симетрична по оста цилиндрична електромагнитна ситема индуктор – товар, като за феромагнитна сърцевина е избрана стоманена тръба,

- където: 1 – бобина на индуктора с вътрешен диаметър d_1 ;
 2 – стоманена тръба /товар/ с външен диаметър d_2 ;
 3 – въздушна междина между индуктора и товара;
 4 – въздушно пространство отвън на индуктора;
 5 – въздушно пространство в стоманената тръба /товар/



Фиг. 2. Схема на цилиндрична електромагнитна система индуктор – товар

Изходните данни за проектирането на индуктора са известните при внедряването на система за нагряване на флуиди на определено място.

Примерни изходни данни са:

Дебит на водата в канализационната мрежа – $Q=0,2$ l/s

Температура на водата във вода преносната канализационната мрежа – $T_{C1}=20^{\circ}\text{C}$

Температура след нагряване на водата – $T_{C2}=50^{\circ}\text{C}$

Методиката на проектиране се състои в оптимален избор на тръбата на индуктора, диаметъра и дължината на индуктора, електрическо и конструктивно оразмеряване на индукционната бобина. Може да има следната последователност:

1. Избор на конструктивни параметри на нагряваната тръба (водосъдържател) – схема 2

- определяне диаметъра на тръбата:

$$(1) \quad d_2 \geq 0,2 \cdot \sqrt{\frac{Q}{10 \cdot \pi \cdot V}}$$

където: V – скорост на водата в тръбата

Според измерванията в тръбите от преносната системата $V=(1\div 2)\text{m/s}$.

В теплообменника се приема по-малка скорост за по-дълго време на нагряване. Приема се $V=(0,2\div 0,4)\text{m/s}$

$$d_2 \geq 0,2 \cdot \sqrt{\frac{0,2}{10 \cdot \pi \cdot 0,2}} = 0,04\text{m}$$

Избира се стандартна стоманена тръба примерно с диаметър

$$d_2 = 63\text{mm} = 2,5 \text{ цола}$$

- определяне дебелината на тръбата – b_2 :
Налягането на водата е (1÷6) атмосфери – превърнато в $\text{bar}=(1,01\div 6.0795)$.
Според стандартите на параметрите, тръбите с диаметър ~~63mm~~ отговарят дебелини (2÷5,8) mm.

Избира се $b_2 = 0,002\text{m}$ издържаща до 10bar

- определяне дължината на тръбата, обхваната от магнитното поле на индуктора
Избраната дължина трябва да осигури необходимото подгриване на водата според избрана мощност. Силата на магнитното поле спада по експоненциален закон близо до края на индуктора /няколко сантиметра след края на бобината/. Също така, тръбата е с определена дължина в зависимост от приложението/да се побере в устройството/. Диапазонът обикновено се избира (0,2÷0,6) m

В случая се избира $h_2 = 0,3\text{m}$.

- определяне изолация между индуктора и нагриваната тръба
Поставя се изолационен материал с дебелина $b_3=1\div 10$ mm.
За примера се избира $b_3 = 0,01\text{m}$, защото се работи с високо напрежение и честота и е близо до водна среда.
Вътрешният диаметър на индуктора е:

$$d_1 = d_2 + 2 \cdot b_3 = 0,06 + 2 \cdot 0,01 = 0,08 \text{ m}$$

2. Електрически изчисления

2.1. Необходима полезна (активна) електрическа мощност за нагриване на водосъдържателя – P_o

$$(2) \quad P_o = Q \cdot c \cdot (T_{oc} - T_{ic}) \quad [\text{kW}]$$

Където: Q – дебит на водата 0,2l/s;

T_{oc} и T_{ic} – температура на флюида на входа и изхода на системата;

c – атмосферно налягане по линията на насищане $\approx 1\text{kJ/kg.K}$

$$P_o = 0,2 \cdot 1 \cdot (50 - 20) = 6\text{kW}$$

$$P_o = 6\text{kW}$$

2.1.1. Избор на захранващо напрежение U_i

- при мощност < 10kW се използва еднофазно захранване 220Vac;
- при мощност > 10kW се използва трифазно захранване 380Vac.

2.2. Специфичната повърхностна мощност на водосъдържателя е:

$$(3) \quad P_{os} = \frac{P_o}{3,14 \cdot d_2 \cdot h_2} \quad \text{kW/m}^2$$

$$P_{os} = \frac{P_o}{3,14 \cdot d_2 \cdot h_2} = \frac{6}{3,14 \cdot 0,06 \cdot 0,33} = 96,46\text{kW/m}^2$$

2.3. Избрана стойност на относителната магнитна проницаемост – μ_p
В температурния диапазон от (20 до 200) °C е валидна зависимостта:

$$(4) \quad \mu_p = \mu_{20} \cdot \sqrt[4]{\frac{P_2}{20 \cdot 10^{-8}}}$$

където: ρ_2 – специфичното електрическо съпротивление на стомана 45
при t°C от 20 до 100°C (по таблица) е от $19 \cdot 10^{-8}$ до $24 \cdot 10^{-8} \Omega \text{mm}$.

В случая се избира $\rho_2 = 21 \cdot 10^{-8} \Omega \text{mm}$.

Стойността на относителната магнитна проницаемост зависи от съдържанието на въглерод и от напрегатостта на магнитното поле H(A/m) и приема стойности от 10 до 1000 при $H = 10^2 + 10^3$ (A/m).

μ_{20} – изчислена стойност на относителната магнитна проницаемост при 20°C [2] от графика при специфичната повърхностна мощност при $P_{\text{ср}} = 96 \text{ kW/m}^2$ се избира $\mu_{20} = 40$.

$$\mu_p = \mu_{20} \cdot \sqrt[4]{\frac{P_2}{20 \cdot 10^{-8}}} = 40 \cdot \sqrt[4]{\frac{21 \cdot 10^{-8}}{20 \cdot 10^{-8}}} = 40,5$$

2.4. Дълбочина на проникване на електромагнитните вълни в повърхността на водосъдържателя

$$(5) \quad \Delta = 503 \cdot \sqrt{\frac{E}{\mu_p \cdot f}}$$

$$\Delta = 503 \cdot \sqrt{\frac{P}{\mu_p \cdot f}} = 503 \cdot \sqrt{\frac{21 \cdot 10^{-8}}{40,5 \cdot 50 \cdot 10^3}} = 1,6 \cdot 10^{-4} \text{ m} \approx 0,16 \text{ mm}$$

Избраната дебелина на тръбата на индуктора трябва да е $b_1 \geq 1,3 \cdot \Delta_1$.

В случая това условие се изпълнява.

2.5. Напрегатостта на магнитното поле на повърхността на товара – H_{02} , A/m

Определя се по формулата:

$$(6) \quad H_{02} = \sqrt{\frac{P_{\text{ср}} \cdot 10^6}{\sqrt{\rho_2 \cdot \mu_p \cdot f \cdot k_4}}} \text{ A/m}$$

Корекционният коефициент k_4 се определя от съотношението b_1/Δ по графика [2] и в случая има стойност $k_4 = 1,1$

$$H_{02} = \sqrt{\frac{P_{\text{ср}} \cdot 10^6}{\sqrt{\rho_2 \cdot \mu_p \cdot f \cdot k_4}}} = \sqrt{\frac{96,5 \cdot 10^6}{\sqrt{21 \cdot 10^{-8} \cdot 40,5 \cdot 50 \cdot 10^3 \cdot 1,1}}} = 0,32 \cdot 10^4 \text{ A/m}$$

2.6. Коефициентът на връзка характеризира взаимодействието между индуктора и металния топлообменник k_b

Коефициентът на връзка за случая $h_1 \approx h_2$ се определя приблизително по формулата:

$$(7) \quad k_b = 3,5 \cdot \frac{d_1 \cdot k_1}{h_2 \cdot k_2}$$

където: k_1 – функция, получаваща се от отношението на диаметъра на индуктора към неговата височина – от графиката [2] се получава $k_1=1,6$;

k_2 – функция, получаваща се от отношението на височината на товара към диаметъра – от графиката [2] се получава $k_2=2$

$$k_b = 3,5 \cdot \frac{d_1 \cdot k_1}{h_2 \cdot k_2} = 3,5 \cdot \frac{0,06 \cdot 1,6}{0,32} = 0,56$$

2.7. Напрегнатостта на магнитното поле на повърхността на индуктора H_{01} , [A/m]:

$$(8) \quad H_{01} = \frac{H_{02} \cdot h_2}{k_b \cdot h_1} \text{ [A/m]}$$

$$H_{01} = \frac{H_{02} \cdot h_2}{k_b \cdot h_1} = \frac{0,32 \cdot 10^4 \cdot 0,33}{0,56 \cdot 0,3} = 0,63 \cdot 10^4 \text{ A/m}$$

2.8. Активната мощност на индуктора в kW е :

$$(9) \quad P_1 = 3,14 \cdot 10^{-6} \cdot H_{01}^2 \cdot h_1 \cdot d_1 \cdot \sqrt{\rho_1 \cdot f} \cdot R_1 \cdot \frac{1}{k_3} \text{ [kW]},$$

където: k_3 – коефициент на запълване на индуктора (обикновено $k_3=(0,8\div 0,9)$ – избира се $k_3=0,9$

$$P_1 = 3,14 \cdot 10^{-6} \cdot H_{01}^2 \cdot h_1 \cdot d_1 \cdot \sqrt{\rho_1 \cdot f} \cdot R_1 \cdot \frac{1}{k_3} =$$

$$3,14 \cdot 10^{-6} \cdot (0,63 \cdot 10^4)^2 \cdot 0,33 \cdot 0,03 \cdot \sqrt{2 \cdot 10^{-7} \cdot 50 \cdot 10^3} \cdot 1 \cdot \frac{1}{0,9} = 1,16 \text{ kW}$$

2.9. Реактивната мощност на индуктора в kW е :

$$(10) \quad P_{Q1} = |R_1| \text{ [kW]}$$

$$P_{Q1} = |R_1| = 1,16 \text{ kW}$$

2.10. Реактивната мощност в товара

$$(11) \quad P_{Q2} = 0,6 |R_2| \text{ [kW]}$$

$$P_{Q2} = 0,6 |R_2| = 0,6 \cdot 6 = 3,6 \text{ kW}$$

2.11. Реактивната мощност във въздушната междина в kW е :

$$(12) \quad P_{Q2} = 3,14 \cdot 10^{-9} \cdot H_{Q2}^2 \cdot f \cdot h_1 \cdot (d_1^2 - d_2^2) \quad [kW]$$

$$P_{Q2} = 3,14 \cdot 10^{-9} \cdot (0,63 \cdot 10^4)^2 \cdot 50 \cdot 10^3 \cdot 0,33 \cdot (0,08^2 - 0,06^2) = 5,76 kW$$

2.12. Реактивната мощност в пространството на системата индуктор-товар в kW е:

$$(13) \quad P_{Q4} = (P_{Q2} + P_{Q3}) \cdot \frac{1 - k_N}{k_N} \quad [kW]$$

Където: k_N – коефициент на Нагаока и се определя от графика [1].

$$k_N = k_n \left(\frac{d}{h} \right) = k_n \left(\frac{0,2}{0,3} \right) \text{ от графиката } k_N = 0,75$$

$$P_{Q4} = (P_{Q2} + P_{Q3}) \cdot \frac{1 - k_N}{k_N} = (3,6 + 5,76) \cdot \frac{1 - 0,75}{0,75} = 3,12 kW$$

2.13. Активната мощност P_2 се изчислява по:

$$(14) \quad P_2 = \sum_i P_i \quad [kW]$$

$$P_2 = P_1 + P_0 = 1,16 + 6 = 7,16 kW$$

2.14. Реактивна мощност P_{Q2} по:

$$(15) \quad P_{Q2} = \sum_i P_{Qi} \quad [kW]$$

$$P_{Q2} = P_{Q1} + P_{Q2} + P_{Q3} + P_{Q4} = 1,2 + 3,6 + 5,8 + 3,12 = 13,7 kW$$

2.15. Пълната мощност на системата по:

$$(16) \quad P_{22} = \sqrt{P_2^2 + P_{Q2}^2} \quad [kW]$$

$$P_{22} = \sqrt{7,16^2 + 13,7^2} = 15,5 Kw$$

2.16. Електрическото кпд:

$$(17) \quad \eta_e = \frac{P_2}{P_2}$$

$$\eta_e = \frac{P_2}{P_2} = \frac{6}{7,16} = 0,839 = 0,84$$

2.17. Коефициент на мощност – $\cos\varphi$

$$(18) \quad \cos\varphi = \frac{P_{\Sigma}}{P_{S\Sigma}}$$

$$\cos\varphi = \frac{P_{\Sigma}}{P_{S\Sigma}} = \frac{7,16}{15,6} = 0,46$$

2.18. Ток през индуктора – I_1

$$(19) \quad I_1 = \frac{P_{S\Sigma} \cdot 10^3}{U_1} \text{ [A]}$$

$$I_1 = \frac{17,8 \cdot 10^3}{310} = 50 \text{ A}$$

2.19. Напрежение върху индуктора

U_1 – ефективна стойност на първата хармонична на инвертора [3]

При $E=280\text{V} \div 315\text{V}$

$$(20) \quad U_1 = \frac{\pi \cdot U_i}{4} \text{ [V]}$$

$$U_1 = \frac{\pi \cdot U_i}{4} = \frac{\pi \cdot 315}{4} = 247 \text{ V}$$

2.20. Броят на навивките на индуктора:

$$(21) \quad W_1 = \frac{H_{\Sigma 1} \cdot h_1}{\sqrt{2} I_1}$$

$$W_1 = \frac{1,01 \cdot 10^4 \cdot 0,93}{1,41 \cdot 50} = 43 \text{ навивки}$$

Реализираната методика за проектиране предлага определяне на параметрите на водосъдържателя, електрическите и магнитните параметри на индуктора и определяне броя на навивките му.

Получените резултати показват, че проектирания индуктор напълно удовлетворява изискванията на проточен битов бойлер.

Ниският фактор на мощност на индуктора, като товар на инвертора, обуславя голям реактивен ток през бобината на инвертора, което трябва да се има в предвид при проектиране на инвертора и избор на проводника на индуктора.

Литература:

1. Марева Д., Юдов Д., Марев Е. „Автономен инвертор за индукционно нагряване на вода”, ВФУ 2010.
2. Кувалдин А.Б. Индукционный нагрев ферромагнитной стали питания / Энергоатомиздат. Москва. 1988.
3. Sugimura H., Muraoka H., Nakaoka M. “A Novel Soft Switching PWM Power Frequency Converter with Non DC Smoothing Filter Link for consumer High-Frequency Induction Heating”, IEEE 2004.