

استخدام التيارات عالية التردد في تسخين الأسطوانات الفولاذية

الدكتور عدنان علي *

(تاريخ الإيداع 1 / 6 / 2009. قُبل للنشر في 29/9/2009)

□ ملخص □

تستخدم التيارات عالية التردد بشكل واسع في الصناعات المعدنية وخاصةً لتسخين الأسطوانات والصفائح المعدنية تحريضياً ، لذلك لابد من إعداد نموذج رياضي للحسابات الكهروديناميكية والحرارية . في هذا البحث تم دراسة مسألة تسخين الأسطوانات المعدنية الفولاذية الطويلة ذات القطر الصغير والتي تتحرك باتجاه محور ملف التسخين (الملف الذي يمرر التيار عالي التردد ويولد الحقل المغناطيسي الذي يقوم بدور التسخين). كما تم حساب المقاومة غير الخطية للأسطوانات المراد تسخينها بالإحداثيات الأسطوانية، باعتبار أن المحور X يتطابق مع محور الأسطوانة، أخذين بعين الاعتبار دراسة التأثير الحراري للسماحية المغناطيسية وعلاقتها بعمق تسرب الموجة المغناطيسية في معدن الأسطوانة.

الكلمات المفتاحية: تيارات عالية التردد، صناعات معدنية.

* أستاذ مساعد - قسم الطاقة الكهربائية - كلية الهندسة الكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

Employing Higher Frequency Currents in Heating steel Cylinders

Dr. Adnan Ali*

(Received 1 / 6 / 2009. Accepted 29 / 9 / 2009)

□ ABSTRACT □

Higher Frequency Currents are widely used in metallic industries particularly for inductive heating of the metal cylinders and plates. Therefore its highly necessary to prepare a mathematical model for the thermal and electro-dynamic calculations.

In this paper, we studied the problem of heating the long steel, metallic cylinders of small diameter, which moves towards the axis of heating coil (the coil in which passes the higher frequency current and generates the magnetic field that performs the function of heating). We Calculated the nonlinear resistance for the cylinders to be heated by cylindrical coordinates since the axis (X) corresponds with the axis of the cylinder, taking into consideration studying the thermal effect of magnetic tolerance, and its relation with the depth of magnetic wave leak in the cylinder metal.

Key Words: Specific transformers, metal fusion.

*Associate Professor, Dept. of Electrical Power, Faculty of Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia - Syria

مقدمة:

يعتبر تمثيل الظواهر الكهروديناميكية الحرارية من الأمور الهامة . وتظهر الحاجة إلى ذلك أثناء استخدام الملفات ذات التيارات عالية التردد في الصناعات المعدنية. عند مرور التيارات عالية التردد في الملف يتولد حقل مغناطيسي يتشابك مع الاسطوانة المراد تسخينها، فتتعرض فيها تيارات دوامية عالية الشدة تؤدي إلى تسخينها تحريضياً. وتعتبر هذه الطريقة في التسخين صديقة للبيئة.

أهمية البحث وأهدافه:

يهدف هذا البحث بشكل أساسي لإعداد نموذج رياضي يمكننا من حل المسألة الديناميكية والحرارية أثناء تسخين الأسطوانات الفولاذية الطويلة ذات القطر الصغير والمتحركة باتجاه محور ملف التسخين. لهذه الطريقة في التسخين تطبيقات كثيرة في الصناعة منها:

تسخين الأسلاك المعدنية ، تسخين الأسطوانات المعدنية ، خلط و مزج المعادن المصهورة تحريضياً، صهر الفولاذ و الألمنيوم و النحاس تحريضياً ، تسخين الصفائح الرقيقة المعدنية.

طرائق البحث ومواده:

أنجز هذا البحث اعتماداً على المراجع العلمية التي تبحث في هذا المجال ، حيث وضع نموذج رياضي يساعد في إجراء الحسابات اللازمة .

الدراسة التحليلية (النموذج الرياضي) :

إن طريقة التسخين التحريضية المقترحة بواسطة ملف، موضحة في الشكل (1) . توتر الحقل المغناطيسي المتناوب على طول محور الملف [1] :

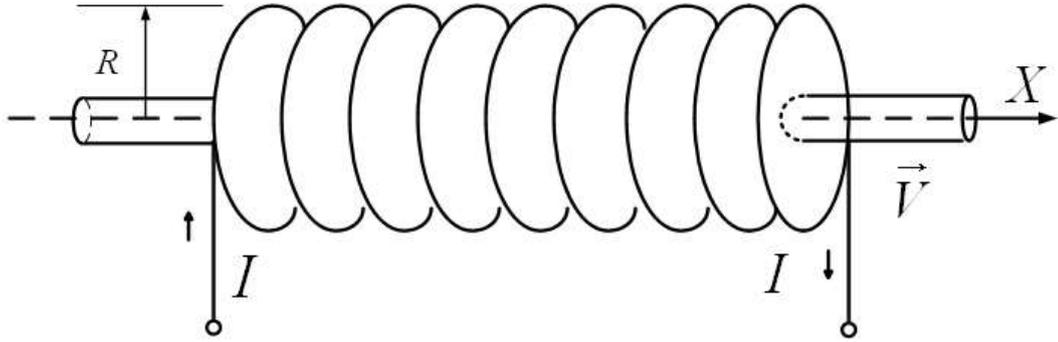
$$H_x = \frac{NI}{2} \left(\frac{\ell - X}{\sqrt{(\ell - X)^2 + R^2}} + \frac{\ell + X}{\sqrt{(\ell + X)^2 + R^2}} \right) \sin(2\pi ft) \quad (1)$$

ℓ - نصف طول الملف .

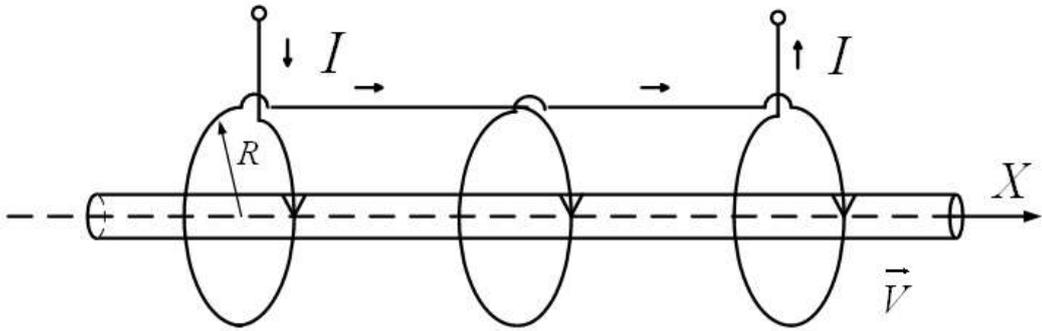
N - عدد لفات الملف .

f - التردد .

أما طريقة التسخين بواسطة حلقات تيار متحدة المحور مع الأسطوانة المراد تسخينها تحريضياً في الشكل (2) .



الشكل (1) نموذج التسخين باستخدام الملف



الشكل (2) نموذج التسخين باستخدام حلقات التيار

في هذه الطريقة، فإن الموجة الكهرومغناطيسية تملك مركبة زاوية واحدة فقط :

$$H_{\alpha} = H_{\max} \sin \frac{\pi X}{L} \sin 2\pi f t \quad (2)$$

H_{\max} - القيمة الأعظمية لتوتر الحقل المغناطيسي .

L - طول الملف .

المعادلات التفاضلية التي تصف توزيع الحقل الكهرومغناطيسي في مقطع الأسطوانة، مع الأخذ بعين الاعتبار

حركتها ضمن هذا الحقل [2] :

مركبة توتر الحقل المغناطيسي :

$$\nabla^2 H = \frac{\mu\mu_0}{\rho} \left(\frac{\partial H}{\partial t} - \nabla \times [V \times H] \right) \quad (3)$$

مركبة توتر الحقل الكهربائي :

$$\nabla \times H = \frac{1}{\rho} (E + \mu\mu_0 [V \times H]) = \frac{1}{\rho} E_n \quad (4)$$

$$E_n = E + \mu\mu_0 [V \times H]$$

V - سرعة الحقل المغناطيسي

E_n - مركبة توتر الحقل الكهربائي التي تؤثر داخل الأسطوانة .

ρ - الناقلية النوعية لمعدن الأسطوانة .

μ - السماحية المغناطيسية لمعدن الأسطوانة .

μ_0 - السماحية المغناطيسية للهواء .

الشروط الحدودية هي مركبات توتر الحقل المغناطيسي على سطح الأسطوانة .

كمية الحرارة الوسطية المفروزة في واحدة الطول من الأسطوانة [3] :

$$W = \frac{1}{2} S_s R_e [E_n \times H^*] ds \quad (5)$$

H^* - مرافق توتر الحقل المغناطيسي .

S_s - السطح الجانبي للأسطوانة .

يتم التسخين تحريضياً بواسطة التيارات عالية التردد والتي تحرضت في الأسطوانة نتيجة تشابك الحقل المغناطيسي معها .

تغير المقاومة النوعية للفولاذ عند تغير الحرارة من درجة حرارة الوسط t إلى نقطة كيوري t_k وهي النقطة التي يفقد فيها الفولاذ صفاته المغناطيسية، تعطى بالعلاقة :

$$\rho = (2.10^{-7} + 18.10^{-10} t) \Omega.m \quad (6)$$

في أبحاث سابقة [4,5] لم يدرس التأثير الحراري للسماحية المغناطيسية ولم يتم التوصل إلى علاقة تبين ارتباط السماحية المغناطيسية بعمق تسرب الموجة المغناطيسية في جدار الأسطوانة .
في هذا البحث درست العلاقة التي تبين التأثير الحراري للسماحية المغناطيسية :

$$\mu(t) = 1 + \chi(t)$$

$$= 1 + \chi_0(t) \left[1 - \left(\frac{t}{t_k} \right)^2 \right] \quad (7)$$

$\chi(t)$ - قابلية التأثير المغناطيسي عند درجة الحرارة t .

$\chi_0(t)$ - قابلية التأثير المغناطيسي عند درجة حرارة الوسط .

$$\chi_0(t) = K(H)^{1/n} \quad (8)$$

العوامل n و k تأخذ قيم تتعلق بمجالات تغير شدة توتر الحقل المغناطيسي H وتعطى في الجدول (1) .

أيضاً استخدمت العلاقة التي تبين ارتباط السماحية المغناطيسية بعمق تسرب الموجة المغناطيسية في جدار الأسطوانة :

$$\begin{aligned}\mu &= \mu_e \left[\frac{1 - (b - r)}{(b - r_k)} \right]^2 \\ r &= 503 \sqrt{\frac{\rho}{\mu \cdot f}} \\ r_k &= 503 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_{\max} \cdot f}}\end{aligned}\quad (9)$$

b - نصف قطر الأسطوانة .

r_k - قيمة r عندما تكون السماحية أعظمية .

r - عمق تسرب الموجة المغناطيسية في الأسطوانة .

ويكون شعاع بيوتنغ [7،6] :

$$S = \frac{\sqrt{8n}}{2n(4n+1)(2n+1)^{1/4}} \left[1 + \left(\frac{\mu_e \mu_0 [V \times H_x]}{\rho H_x} \right)^2 \right] \quad (10)$$

μ_e - السماحية المغناطيسية على سطح الأسطوانة.

V - سرعة الحقل المغناطيسي.

المعادلات التفاضلية التي تشرح عملية تسخين الأسطوانة الفولاذية أثناء حركتها ضمن ملف باتجاه المحور X ،

مع الأخذ بعين الاعتبار أن التبريد بواسطة الهواء [6] :

$$\frac{\partial T}{\partial t} + V \frac{\partial T}{\partial t} = a^2 \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + a^2 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{W}{C} - \frac{\gamma}{C} (T - T_0) \quad (11)$$

C - السعة الحرارية لوحد الطول من الأسطوانة .

a^2 - عامل النقل الحراري .

T_0 - درجة حرارة الوسط .

γ - عامل التبادل الحراري .

بالنسبة للفولاذ $a^2 = 2,1 \cdot 10^{-5} \frac{m^2}{s}$. أما سرعة انتشار الحرارة $V_T = 1,4 mm/s$. $V \gg V_T$.

يمكن إهمال الطرف $a^2 \frac{\partial^2 T}{\partial r^2}$ في العلاقة السابقة . يمكن حل العلاقة (11) بطريقة فصل المتغيرات $T(r, x) = u(r)\theta(x)$. عندها تفصل العلاقة تلك إلى قسمين : القسم الأول، يشرح توزع الحرارة في مقطع الأسطوانة :

$$\frac{\partial u}{\partial t} = a^2 \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right) \quad (12)$$

عند الترددات العالية يكون عمق تسرب الموجة المغناطيسية أقل من نصف قطر الأسطوانة، وبالتالي يمكن

إهمال تأثير منابع الحرارة الداخلية واعتبار أن التسخين يتم عن طريق الفيض الحراري ذات الكثافة $\frac{W}{2\pi b}$ ويتجه من سطح الأسطوانة إلى مركزها . لذلك فإن الشروط الحدودية تستخدم لحل العلاقة التفاضلية (12)

$$\frac{\partial u}{\partial r} /_{r=b} = \frac{W_{(x)}}{2\pi b} \quad (13)$$

إن حل هذه العلاقة معطى في [5] .

أما القسم الثاني من العلاقة التفاضلية فيشرح توزيع الحرارة $\theta(x)$ على طول محور الأسطوانة :

$$\frac{\partial \theta(x)}{\partial x} = g(x) - h\theta(x) \quad (14)$$

$$\theta(x) = T - T_0 \quad , \quad g(x) = \frac{W}{V.C} \quad , \quad h = \frac{2\pi b \gamma}{C.v}$$

$$\mu_{(x)} = S^2 \cdot \mu_e \quad , \quad W_{(x)} = \frac{\pi.b}{2} [\pi.f.S.\mu_{(x)}.\mu_0]^{1/2} . H^2$$

حسب [3] فإن المقاومة الفعلية غير الخطية للأسطوانة :

$$D = (2N\ell)^2 \int_{-\ell}^{\ell} \frac{[\pi\ell\mu\rho]^{1/2}}{2\pi b} dx \quad (15)$$

$\rho.\mu$ - هو جداء الناقلية النوعية بالسماحية المغناطيسية لمعدن الأسطوانة الفولاذية و تتغير قيمة الجداء

حسب نوع الفولاذ.

المردود عند الترددات العالية :

$$\eta = \frac{b}{R} \int_{-\ell}^{\ell} [\rho.\mu]^{1/2} dx \quad (16)$$

الطاقة المصروفة على تسخين الأسطوانة :

$$P_1 = \frac{H_{\max}^2}{b} \int_{-L/2}^{+L/2} [f\rho\pi\mu]^{1/2} dx \quad (17)$$

$$L = 2\ell$$

ضباغات الطاقة في حالة استخدام طريقة حلقات التيار :

$$P_2 = (\pi f \rho_2 \mu_2)^{1/2} \left(\frac{H_{\max}^2 . L}{R_2} \right) \quad (18)$$

ضباغات الطاقة على الأطراف :

$$P_3 = 2(\pi f \rho_2 \mu_2)^{1/2} H_{\max}^2 \ell n \frac{R_2}{b} \quad (19)$$

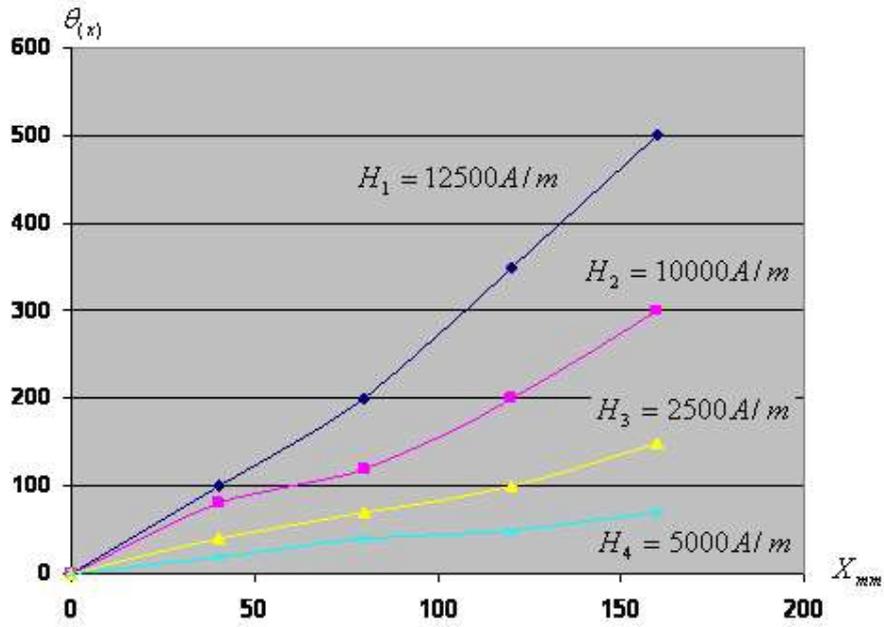
مردود طريقة حلقات التيار :

$$\eta = \frac{P_1}{P_1 + P_2 + P_3} \quad (20)$$

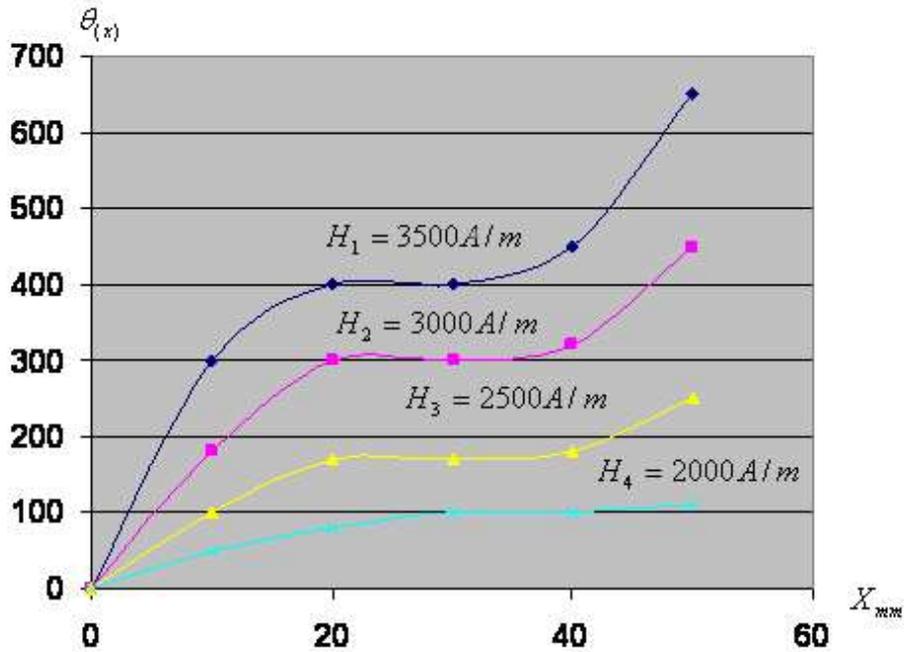
- R_2 - نصف قطر حلقة التيار .
- ρ_2 - المقاومة النوعية لحلقة التيار .
- μ_2 - السماحية المغناطيسية لحلقة التيار .

النتائج والمناقشة:

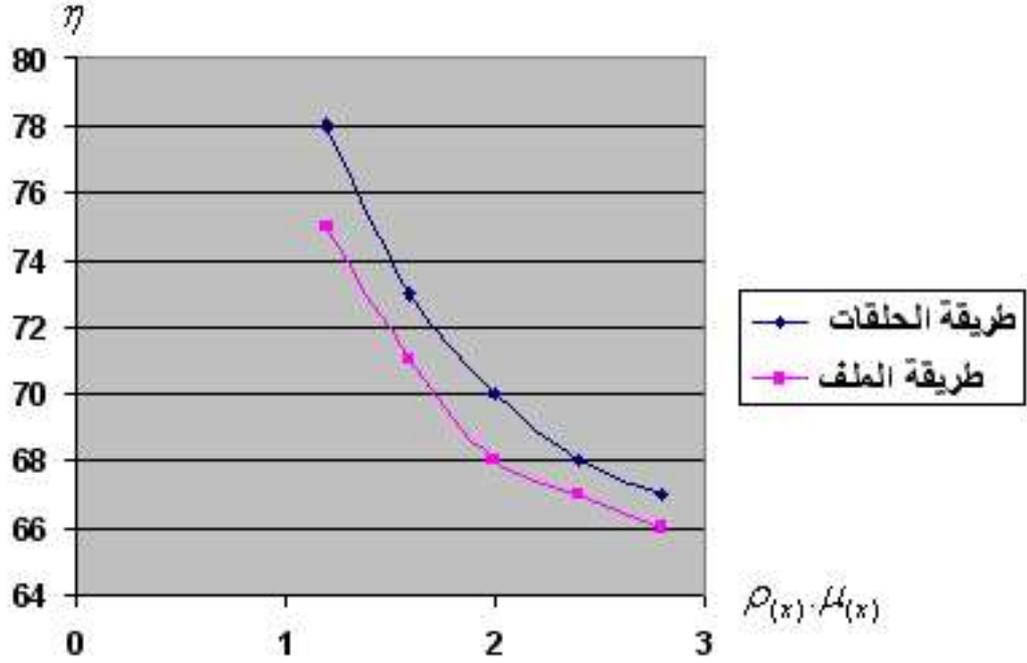
- الحسابات أجريت على أسطوانة فولاذية قطرها $2mm$ ، وتتحرك ضمن الحقل المغناطيسي (ضمن الملف) بسرعة $V = 0,5m/s$ عند قيم مختلفة لتوتر الحقل المغناطيسي H على سطح الأسطوانة .
- في الشكل (3) نجد تغير درجة الحرارة $\theta(x)$ حسب الطريقة الأولى؛ أي باستخدام ملف، وذلك عند تحرك الأسطوانة داخل الملف ذات الطول $L = 15cm$ والقطر $R = 1,5cm$ والتردد $f = 1,5MHz$ يعتبر طول الملف أكبر بكثير من قطره $L \gg R$.
- نلاحظ أن $\theta(x)$ تهبط بشكل حاد على أطراف الملف بينما تكون أعظمية في المنتصف . لذلك لكي يتم التسخين بشكل جيد يجب أن تتحرك الأسطوانة ضمن الملف وتخرج منه ببطء .
- عند التسخين حسب الطريقة الثانية (حلقات تيار) فإن المركبة الزاوية لتوتر الحقل المغناطيسي تتغير حسب قانون جيبي وتستخدم المركبة H_{max} وبالتالي فإن $\theta(x)$ موضحة في الشكل (4) .
- بمقارنة نتائج الطريقة الأولى مع الثانية كما هي موضحة في الشكلين (3 و 4) نجد أن التسخين يكون أكثر انتظاما حسب الطريقة الأولى.
- في الشكل (5) نجد علاقة المردود لطريقة التسخين باستخدام الملف وطريقة التسخين باستخدام حلقات التيار . يتضح أن مردود طريقة التسخين باستخدام حلقات التيار أفضل .
- للسماحية المغناطيسية μ تأثيرات كثيرة في عملية التسخين:
- فهي تؤثر على عمق تسرب الموجة في معدن الأسطوانة كما هو واضح من العلاقة (9).
- على قيمة المردود، كما هو مبين في العلاقة (16).
- على قيمة الاستطاعة المصروفة على تسخين الأسطوانة في العلاقة (17).
- على ضياعات الطاقة في حال استخدام حلقات التيار، كما هو واضح في العلاقة (18).
- على ضياعات الطاقة في الأطراف العلاقة (19).



الشكل (3) علاقة درجة الحرارة بالمسافة التي تدخلها الأسطوانة داخل الملف



الشكل (4) علاقة درجة الحرارة بالمسافة التي تدخلها الأسطوانة داخل حلقات التيار



الشكل (5) علاقة المردود بجداء السماحية المغناطيسية بالمقاومة النوعية للفولاذ ($\rho.\mu$)

الاستنتاجات والتوصيات:

تمكن نتيجة هذا البحث من اختيار الطريقة الأفضل لتسخين الأسطوانات المعدنية ذات القطر الصغير تحريضياً، ومن ثم استخدامها في صناعة النوابض وغيرها، ومعرفة المنطقة المناسبة من الملف التي يكون فيها التسخين منتظماً.

لا يصدر عنها أي دخان أو ضجيج، وهنا تكمن أهمية هذه الطريقة في التسخين، حيث نحافظ على البيئة وصحة الإنسان .

يمكن تصنيع نماذج بقياسات أكبر لتسخين الأسطوانات ذات أقطار كبيرة .

يمكن بناء نموذج مخبري لتسخين الأسطوانات الفولاذية تحريضياً باستخدام التيارات عالية التردد، بشرط توفر منبع لتلك التيارات.

الجدول (1) : علاقة العوامل n و k بقيمة توتر الحقل المغناطيسي H .

H A/m	k	n
40...239	9830	-1,123
239...797	12360	-1,075
797...7400....	17660	-1,018

شرح المخطط الصندوقي:

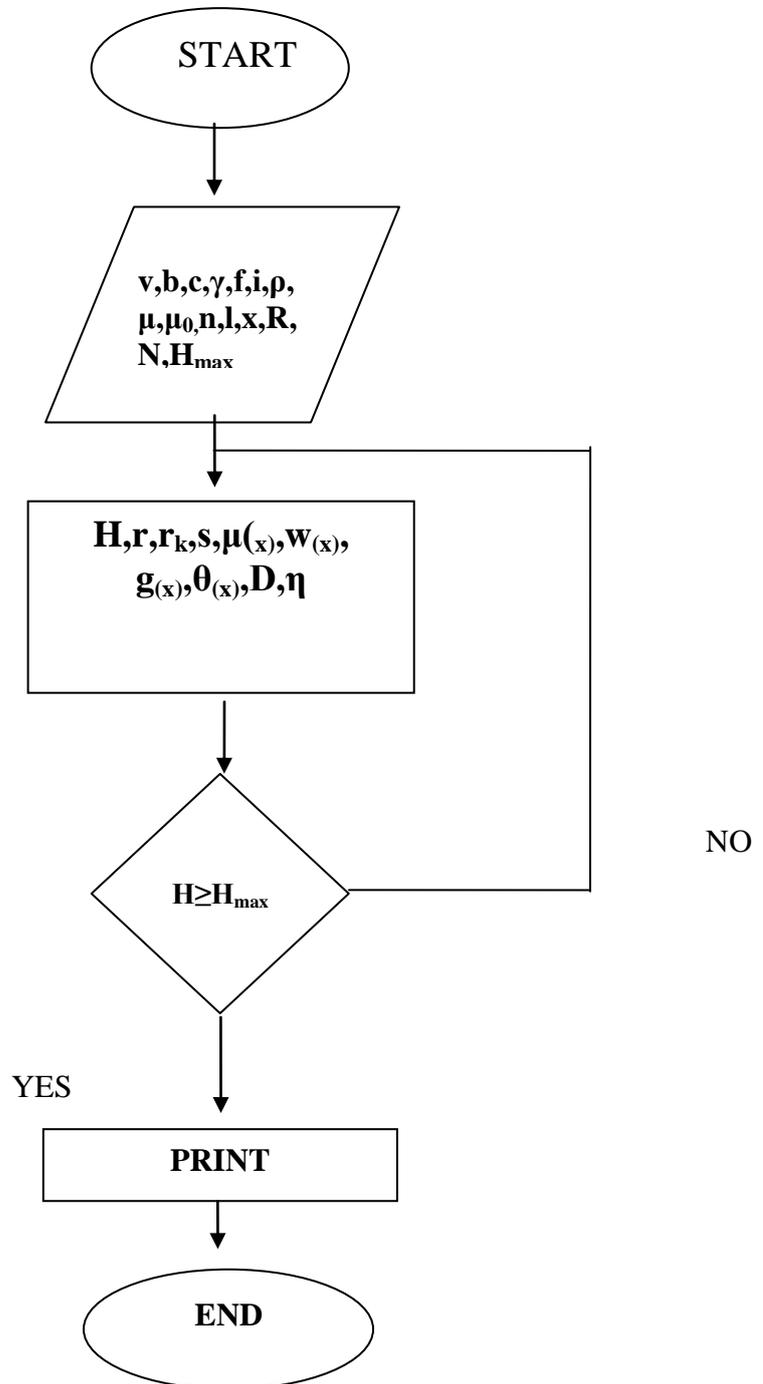
نلاحظ من المخطط الصندوقي أن هناك قيماً معروفة هي قيم الدخل، و قيم مطلوب حسابها، هي قيم الخرج.

قيم الدخل:

- V سرعة الحقل المغناطيسي
- b نصف قطر الأسطوانة
- C السعة الحرارية لوحدة الطول من الأسطوانة
- γ عامل التبادل الحراري
- I شدة التيار
- μ السماحية المغناطيسية لمعدن الأسطوانة
- μ_0 السماحية المغناطيسية للهواء
- n عامل يتعلق بمجال تغير شدة توتر الحقل المغناطيسي
- X المسافة التي تدخل إليها الأسطوانة ضمن الملف
- R نصف قطر الملف
- N عدد لفات الملف
- H_{max} شدة توتر الحقل المغناطيسي الأعظمي
- f التردد

قيم الخرج:

- H شدة توتر الحقل المغناطيسي على سطح الأسطوانة
- r عمق تسرب الموجة
- r_k قيمة r عندما تكون السماحية أعظمية
- S شعاع بيوتنغ و يعطى بالعلاقة (10)
- $\mu_{(x)}$ السماحية المغناطيسية لمعدن الأسطوانة عند دخولها مسافة X داخل الملف
- $W_{(x)}$ كمية الحرارة الوسطية المفروزة في واحدة الطول، و تعطى بالعلاقة (14)
- $\theta_{(x)}$ درجة الحرارة
- $g_{(x)}$ معامل قسمة كمية الحرارة الوسطية على جداء السرعة للحقل المغناطيسي بالسعة الحرارية لوحد الطول
- D المقاومة الفعلية غير الخطية للأسطوانة و تعطى بالعلاقة (15)
- η المردود



الشكل (6) : المخطط الصندوقي

المراجع:

- 1- NIMKOV, F.S. *Theory and calculation of inductive heating equipment*. Bitrosborg, 2005 , 250.
- 2- NIMKOV, F.S. *Calculation inductive heating coils for magnetic cylinders*. Bitrosborg, 2005 , 120.
- 3- TAKASHI,T. *Thermal and magnetic field analysis of induction heating problems*. Journal of Materials Processing Technology, Japan, NO.161,2005,193-198.
- 4- ANNETLE,M. *Induction heating of novel thermoresponsive ferrofluids*. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Germany, NO.289,2005, 5-8.
- 5- RASHPKIN, A.B. *Inductive Heating of colored metals*. Colored metals, Kieve, No.1, 1989, 104-107.
- 6- SLOKHOTSKY,A.D. *Inductive heating Coils*. Linnengrad,1974,264.
- 7- ALI, A. *Theory of electromagnetic fields*. Tishreen University , 2005, 324.

