



## MODEL-BASED STUDY OF LOSSES IN CYLINDRICAL SHAPED INDUCTORS

**Dragomir Grozdanov<sup>1</sup>, Nikolay Hinov<sup>1\*</sup>, Khristo Tarnev<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Department of Power electronics, Technical University of Sofia, 1000 Sofia, Bulgaria

<sup>2</sup>Department of Applied physics, Technical University of Sofia, 1000 Sofia, Bulgaria

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 28 September 2018

Accepted 22 November 2018

#### Keywords:

Induction heating; Power losses;  
Modeling Model based.

### ABSTRACT

Induction heating is a technology known for its highly efficient method of transferring energy from the source to the operated part or area. Inductors performing the conversion of high-frequency electrical energy into electromagnetic field are a major part of this technology. Determining their basic parameters, such as inductance and loss of power at a selected operating frequency, is key in the assessment and design of induction heating processes and systems. The calorimetric method for estimating lost power in the inductor is one of the most accurate. This article explores a variation of this method, which allows the real losses of a real inductor to be evaluated in the laboratory by relatively small power sources. The follow-up experiment is compared to the results achieved by simulating the environment through computer modeling. The main objective of the present study is to achieve the correlation between theoretical modeling and experimental data in order to derive a more general method for estimating the actual loss of power in a given inductor. This would facilitate the design of processes and systems in terms of power requirements by allowing a realistic assessment of the otherwise relatively complex interactions in the inductor between the electric current and the electromagnetic field. The advantages of such an approach are especially striking when working at high frequencies - at the order of 300 kHz, as phenomena such as a skin effect and proximity effect have a significant influence on the resulting electric current, its distribution across the cross section of the conductor, changing its effective cross section.

© 2018 Journal of the Technical University of Gabrovo. All rights reserved.

### ВЪВЕДЕНИЕ

В настоящата статия е разгледана една вариация на calorimetричният метод, която позволява в лабораторни условия, чрез сравнително малки мощности на източника да се оценят реалните загуби на реален индуктор. Експериментът в последствие е сравнен с резултати постигнати чрез симулиране на средата посредством компютърно моделиране. Основната цел на настоящото изследване е постигане на съответствие между теоретичното моделиране и експерименталните данни с цел извеждане на по-обобщен метод за оценка на реалната загубна мощност в определен индуктор.

Това би улеснило проектирането на процесите и системите от гледна точка на изискванията за мощност, като даде възможност за реална оценка на иначе сравнително сложните взаимодействия в индуктора между електрическия ток и електромагнитното поле. Предимствата на подобен подход изпъкват особено ярко при работа с високи честоти – от порядъка на 300kHz, тъй като явления, като повърхностен ефект и ефект на близост оказват съществено влияние върху резултатния електрически ток, неговото разпределение по сечението на проводника, променяйки ефективното му сечение.

### ОПИСАНИЕ

Целта на настоящото изследване е да се намери подходящ метод, който да определи количеството на отделяната енергия в работния индуктор посредством лабораторни измервания. Трудността произтича от ограничените възможности, с които обикновено се разполага в лабораторни условия. Изработката на скалиран (умален) модел на работния индуктор води до предизвикателства свързани с измерване на много малки отклонения и разлики в контролираните величини.

В нашият случай, ако се възприеме непосредствено измерване на електрическата мощност или енергия подавана към индуктора се стига до огромна разлика между реактивната и активната съставка на електрическия ток. За пример може да се посочи 30kVA реактивна енергия срещу само 100W активна енергия. Точността при такова измерване е много ниска и надеждността и адекватността на експеримента са компрометирани. Използването на класическия calorimetричен метод се явява една добра алтернатива. За да бъде приложен обаче, се налага използването на модифициран подход, който да даде необходимата

\* Corresponding author. E-mail: hinov@tu-sofia.bg

точност при измерванията. На фиг. 1 е показан изследваният индуктор.



Фиг. 1 Изследван индуктор

Параметрите на посочения индуктор са както следва:

- Диаметър – 200mm
- Височина – 40mm
- Брой навивки – 2
- Тръба - медна – 6 x 1 mm

Основната задача е да се определи загубната мощност, отделяна в тръбата на индуктора при работа с честота на тока около 300kHz. Подобен индуктор може да използва за приложения свързани с изследването на нано-частици, основно в медицината. За подобни приложения ключов параметър се явява магнитната индукция, генерирана от индуктора. За постигане на високи нива на индукцията е необходимо прилагането на голям ток, тъй като връзката е правопрпорционална.

Другото предизвикателство е изискването за много висока работна честота, което произхожда от размера на нагриваните обекти – често пъти няколко десетки микрометра ( $\mu\text{m}$ ). Оттук произлиза и необходимостта за оценка на мощността, която ще се разсейва в индуктора при зададени – форма на индуктора, необходима магнитна индукция, желана работна честота. Тъй като представеният индуктор представлява само част (секция) от реалният индуктор, а изискването за магнитна индукция води до необходимост от сравнително голяма мощност, то изследването му в лабораторни условия доведе до използването на различен подход при измерванията.

Чрез използване на съвременни средства за измерване на температура, като термовизионната камера, е възможно да се наблюдава и измерва нагриването на определена област на детайл или обект. Това може да извършва безконтактно, с точност до  $0.1^\circ\text{C}$ , като в същото време реакцията на измерването е почти мигновена, за разлика от контактните методи (термо-двойка например).

Същността на предложеният подход се състои в измерването на времето, за което се нагрива повърхността на индуктора, в предварително зададен температурен интервал  $\Delta\theta$  (1), като в същото време е спрял потокът на охлаждащата течност (в нашия случай – вода):

$$\Delta\theta = T_2 - T_1 \quad (1)$$

където:

$T_1$  – начална температура на нагриването;

$T_2$  – крайна температура на нагриването.

Определянето на мощността може да се извърши, като се използва формулата (2):

$$P = \frac{(m_{coil} C_{coil} + m_{H_2O} C_{H_2O}) \cdot \Delta\theta}{t} \quad (2)$$

където:

- $m_{coil}$  – маса на тръбата на индуктора;
- $m_{H_2O}$  – маса на охлаждащата вода в индуктора;
- $C_{coil}$  – специфичен топлинен капацитет на тръбата на индуктора;
- $C_{H_2O}$  – специфичен топлинен капацитет на водата;
- $t$  – време за нагриване;
- $\Delta\theta$  – температурен интервал, определен чрез (1).

Масата на тръбата на индуктора и на водата могат да се определят от геометричните формули за цилиндър. В таблица 1 са дадени необходимите физични свойства на материалите:

Таблица 1

	<b>Cu (мед)</b>	<b>H<sub>2</sub>O (вода)</b>
специфичен топлинен капацитет, C [J/kg . C]	384.4	4180
специфично тегло, $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	8960	1000

В Таблица 2 са представени изчислените стойности за нашия случай:

Таблица 2

	Обем, V [m <sup>3</sup> ]	Маса, m [kg]
Индуктор - тръба	2.04 x 10 <sup>-5</sup>	0.183
Индуктор - вода	1.63 x 10 <sup>-5</sup>	0.016

## РЕЗУЛТАТИ

Лабораторните измервания са извършени за 2 стойности на тока  $I_{coil}$  през индуктора. Работната честота е избрана близка до необходимата за високо честотни приложения. Началната и крайната температура са избрани еднакви с цел по-лесно сравняване на резултатите. Измерването на температурата е извършено посредством наблюдение с термовизионна камера, а времето е засечено чрез хронометър. Резултатите от измерванията и изчисленията са представени в таблица 3.

Таблица 3

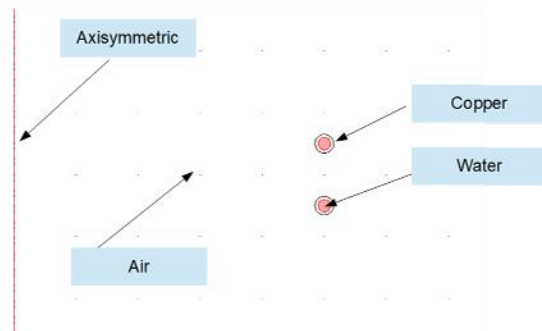
<b>f – 287kHz</b>				
<b>I<sub>coil</sub> [A]</b>	<b>T<sub>1</sub> [°C]</b>	<b>T<sub>2</sub> [°C]</b>	<b>t [sec]</b>	<b>P [W]</b>
101	20	40	21.5	128.95
204	20	40	5	554.47

Измерванията са извършени в специализираната лаборатория по приложение на индукционното нагриване на фирма Ултрафлекс Корпорейшън [1].

Представеният лабораторен метод за измерване на загубната мощност е сравнен със симулация на процеса в средата на COMSOL. Целта на подобно сравнение е

да се определи адекватността на метода, а също и да се изведе по-обобщен метод, който би позволил оценка на загубната мощност при различни геометрични параметри на индуктора. Съставянето на модел на процеса дава възможност за предварителна оценка на индуктора, която да се използва при етапа на оценка и проектиране на цялостната система за индукционно нагряване.

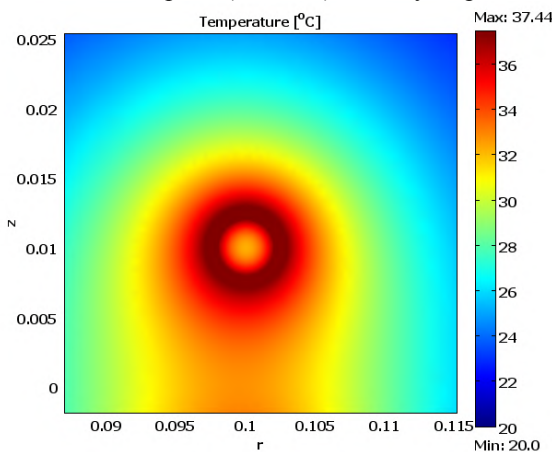
На фиг. 2 е представен моделът на процеса:



Фиг. 2. Описание на модела

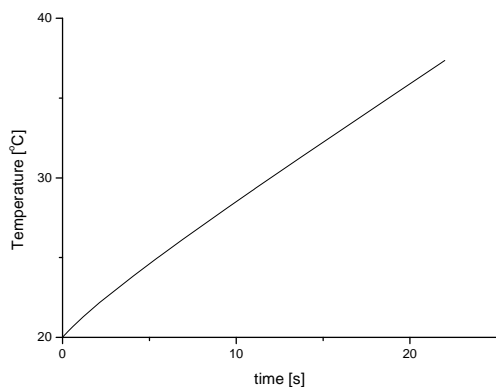
Изображението на фиг. 2 представлява сечение на индуктора по надлъжната му ос. Избран е дву-мерен режим на симулация, тъй като процесът е симетричен по надлъжната си ос и това изисква по-малко ресурси на компютъра, както и по-малко време за изчисленията.

На фиг.3 е представен резултатът от симулацията на температурното поле при 100A захранващ ток. Показана е само едната тръба (навивка) на индуктора.



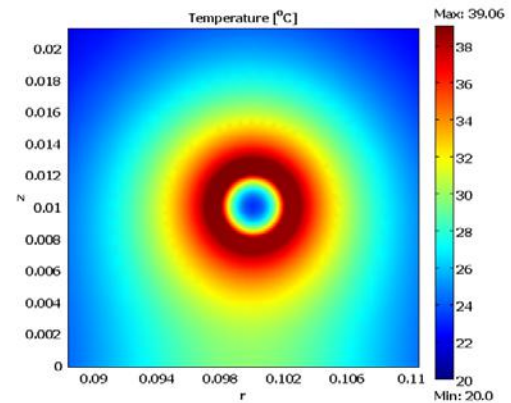
Фиг. 3. Температурно поле при 100A, 21сек, 287kHz

Много ясно и отчетливо се виждат отделните сегменти на процеса и тяхната температура – медната тръба, водата в нея, въздухът около нея.

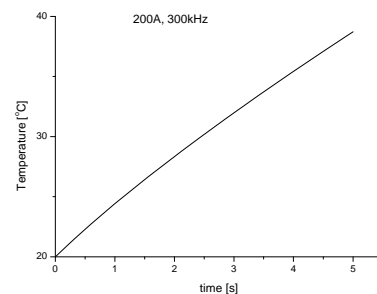


Фиг. 4. Температура на точка от повърхността на индуктора, 100A, 21сек, 287kHz

За сравнение с лабораторните данни е представена температурата на точка от повърхността на индуктора на фиг. 4. Резултатите от симулацията при 200A и 5 сек. са представени на съответно на фиг. 5 и фиг. 6.



Фиг. 5. Температура на точка от повърхността на индуктора, 200A, 5сек, 287kHz



Фиг. 6. Температура на точка от повърхността на индуктора, 200A, 5сек, 287kHz

Представените резултати от симулацията на индуктора могат да бъдат обобщени, като се сравнят с лабораторните измервания. От таблица 3 се вижда, че и в двата случая реалното нагряване е било до 40°C, като е засечено времето за достигане на тази температура. При симулацията е подхордено наобратно – зададено е засеченото време от лабораторните измервания и е отчетено каква температура е постигната на повърхността на индуктора. Сравнението на температурата от симулацията и на тази от реалните измервания може да ни даде информация за това колко точен е методът на измерване, а също и за адекватността на представеният модел. В таблица 4 е представено сравнението на резултатите:

Таблица 4

Ток през индуктора, $I_{\text{coil}}$	Очаквана температура, $T_{\text{LAB}}$	Получена температура, $T_{\text{SIM}}$
100A, 21сек, 287kHz	40°C	37.35°C
200A, 5сек, 287kHz	40°C	38.72°C

Загубната мощност е обратно пропорционална на ефективното сечение на проводника, през който тече токът. Предимството на представеният лабораторен метод и симулация е, че се отчитат всички особености свързани с геометрията на индуктора. На първо място

това е повърхностният ефект от провеждането на електрически ток с висока честота. Ефективното сечение се измества към повърхността на проводника, като това значително увеличава електрическото съпротивление. На второ място, но не и по важност, това е ефектът на близостта. Неговата същност се изразява в това, че когато тече ток през два проводника, които са в близост един до друг, те изпитват взаимно влияние на електромагнитното поле, генерирано от самите тях. Това влияние е, както възникване на механична сила (сила на Лоренц), така и изместване на силовите линии на полето, респективно на сечението, през което проводникът провежда електрическия ток. Имено последното въздействие се увеличава значително с повишаване на честотата и води до драстично увеличаване на загубите на енергия в индуктора.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изследването на методите за измерване на загубната мощност в индукторите на системите за индукционно нагряване дава възможност за по-прецизна оценка на необходимите ресурси за реализиране на зададен процес. Параметри, като габаритна мощност, обем на кондензаторна батерия, охладителна мощност е необходимо да бъдат известни в началото на разработката на индукционните системи за да се избегне необходимостта от ненужно преоразмеряване или от грешки, водещи до скъпи и продължителни преработки.

Представеният метод дава възможност за реална оценка на загубната мощност на индуктори в лабораторни условия, където ресурсите са ограничени. Въпреки това, точността на оценката е много добра, като се има предвид, че са отчетени всички важни влияния на геометрия и размери.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Извършеното изследване се реализира в рамките на проекта "Моделно базирано проектиране на силови електронни устройства с гарантирани показатели", договор ДН 07/06/15.12.2016 г., с Фонд научни изследвания.

## REFERENCE

- [1] [www.ultraflexpower.com](http://www.ultraflexpower.com), UltraFlex Co Ltd, 2018.
- [2] Chaki S., S. Aono; N. Andoh; Y. Sasaki; N. Tanino; O. Ishihara, Experimental study on spiral inductors, Proceedings of 1995 IEEE MTT-S International Microwave Symposium, Year: 1995, Page s: 753 - 756 vol.2.
- [3] Toshiyuki Ken; Yuanbo Guo; Koji Shiozaki; Di Xu; Khai Ngo, High current and high frequency planar inductor loss measurement and analysis, 2013 Twenty-Eighth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Year: 2013, Page s: 1689 – 1692.
- [4] Linkous R., A. W. Kelley, K. C. Armstrong, "An improved calorimeter for measuring the core loss of magnetic materials", in Proc. APEC'2000, vol. 2, pp. 633 – 639.
- [5] Nakahara K., "The equivalent circuit modeling of spiral inductor", 1992 NATIONAL CONVENTION REPORT OF IEICE, vol. c-78, pp. 2-416, 1992.
- [6] Chaki S., Loss reduction of a spiral inductors, pp. 61-68, 1994.
- [7] Thottuvelil V. J., T. G. Wilson, H. A. Owen JR., "High-Frequency Measurement Techniques for Magnetic Cores", in IEEE Trans Power Electron, vol.5, NO.1, Jan.1990, pp. 41-53.
- [8] Han Y., G. Cheung, A. Li, C. R. Sullivan, D. J. Perreault, "Evaluation of Magnetic Materials for Very High Frequency Power Applications", in Proc. IEEE Power Electronics Specialists Conf., pp. 4270 - 4276, Jun. 2008.
- [9] Bertotti G., "General properties of power losses in soft ferromagnetic materials," IEEE Trans. Magn., vol. 24, pp. 621-630, Jan. 1988.
- [10] Chen Y., P. Pillay, "An Improved Formula for Lamination Core Loss Calculations in Machines Operating with High Frequency and High Flux Density Excitation", in Proc. Of IAS Annual Meeting, vol. 2, pp. 759 - 766, Oct. 2002.
- [11] Bertotti G., M. Pasquale, "Physical interpretation of induction and frequency dependence of power losses in soft magnetic materials," IEEE Trans. Magn. Vol. 28, pp. 2787-2789, Sept.1992.