

РАЗВИТИЕ НА ИНДУКЦИОННО НАГРЯВАНЕ НА ФЛУИДИ

ст.ас.Даниела Марева Бургаски Свободен Университет

DEVELOPMENT OF INDUCTION HEATING OF FLUIDS

Daniela Mareva

Abstract - Generally, an induction heating is a contactless method of generating the heat in a magnetically conductive work piece assembly by inducing eddy current losses in the work piece from an extend high-frequency alternating magnetic field, which is composed of the high-frequency inverters using gate controlled power switching devices MOS or IGBT modules. This is a convenient induction heating category in electrical heat processing because of its ready-availability, precision temperature rise, flexibility, cleanliness, speed of response, safety, compactness in size, and ease of control. Technologies proposed by the authors have attracted special interest in the fields of industrial, medical, chemical and consumer heat energy processing utilizations in the pipeline systems.

Keywords – resonant inverter, heating fluids.

1. Общи понятия / физически основи/ за индукционното нагряване

Електромагнитното индукционно нагряване е технология на основата на индукцията на електропроводимите материали (метали). Индукционното нагряване се използва често в много термични процеси, като топене и нагряване на метали. При него обикновено се загрева целия обем на нагрявания метал. Също така позволява да се нагрява локално място.

Принципите на индукционното нагряване са основно базирани на два добре познати физически феномена: електромагнитна индукция и ефект на Джаул.

Обща характеристика на променлив ток е, че при протичането му по проводника той се разпределя по външната страна на проводника –така наречения Скин ефект. Този ефект се характеризира с дълбочина на проникване δ , която се дефинира като дебелина на слоя, измерен отвън навътре, където се използва 87% от мощността [7].



Фиг.1. Дълбочина на проникване на тока

Формулата за дълбочината на проникване се получава от равенството на Максвел. За цилиндричен товар с диаметър, който е много по-голям от δ формулата е:

$$(1) \quad \delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \cdot \mu \cdot f}} \quad [m]$$

Където: ρ - специфична проводимост [$\Omega \cdot m$];
 μ – магнитна проводимост [H/m] ($\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$);
 f – честота [Hz];

Дълбочината на проникване зависи обратно пропорционално от работната честота.

Феромагнитните материали имат много по-голяма относителна магнитна проницаемост μ_r . Тогава тези материали притежават много по-изразен Скин ефект (δ става малко). Магнитната проницаемост на феромагнитните материали много по-силно зависи от съставките в материала и от условията (температура, интензивност на магнитното поле и насищане). Над температурата на Кюри магнитната проницаемост изведнъж спада и достига $\mu_r = 1$ и бързо нараства дълбочината на проникване.

Вихровите токове, които се индуцират в материала са много по-големи от външната страна и намаляват близо до центъра. В такъв случай топлината се разпространява по-добре от външната страна.

Товарът на индукционно нагриваните инсталации се нагрива, защото в него се индуцират вихрови токове, в резултат на ефекта на Джаул.

$$(2) \quad P = R \cdot I^2$$

В общия случай връзката между необходимата мощност и нагриваемото количество флуид (вода) е:

$$(3) \quad P = \pi \cdot d \cdot h \cdot H^2 \cdot \sqrt{\pi \cdot \rho \cdot f \cdot \mu_r \cdot \mu_0} \cdot C \cdot F$$

Където: d – диаметър на цилиндъра [m];
 h – височина на цилиндъра [m];
 H – интензитет на магнитното поле [A/m];
 ρ – специфично съпротивление [$\Omega \cdot m$];
 μ_0 [H/m] – магнитна проницаемост във вакуум;
 μ_r – относителна магнитна проницаемост[H/m];
 f – честота [Hz];
 C – фактор на копиране (връзка);
 F – фактор на прехвърляне на мощност.

Резултатите дават възможност да се направи следното заключение – мощността ще нараства с нарастването на интензивността на магнитното поле H , което означава нарастване на броя на навивките на индуктора. C нарастване на честотата относително малко нараства мощността. Загубите в захранването нарастват и дълбочината на проникване става по-малка. Характеристиките на материала, който се нагрива играят много важна роля (ρ и особено μ_r). За феромагнитни материали се добавя и резкия спад на мощността, когато се достигне температура на Кюри ($\mu_r = 1$ ако $T > T_{\text{CURIE}}$).

Свойствата на индукционно нагриване на основата на Скин ефекта позволяват получаване на мощност с висока плътност. Хистерезисните загуби в работния материал се получават на базата на високочестотни редуващи се магнитни полета.

Самото нагриване зависи както от различните геометрични размери, така и от формата на индуктора /*тръба, тръбна плоскост, спирала и други*/.

Най-опростения начин за обяснение на индукционното нагриване е чрез използване на тръба с проста цилиндрична геометрия. Изборът на тръбата става в зависимост от ефективността на нагриването и от честотата на захранването на преобразувателя.

$$E_c = N \frac{d\Phi}{dt} \quad [V] \quad (4)$$

(4)

Фиг.2. Опростена заместваща схема на индуктор

Където: E – индуктивна ел.магнитна сила [V];
 N – брой навивки на бобина;
 Φ – поток [Wb];
 t – време [s].

$$I_w = NI_c \quad [A]$$

Обяснение на физическия процес нагряване-представлява най-общо добавяне на кинетична енергия към всички молекули и извеждането им от състояние на покой в състояние на трептене. Енергията от инвертора се провежда чрез индуктора към металния цилиндър и получената върху му топлина преминава към водата.

Индукционното нагряване на флуиди при захранване с висока честота е намерило приложение при: индукционно нагряване на флуиди в химическата индустрия и битово приложение [3 и 4], получаване на свръхнагрятата пара (генератори за ниско и високотемпературна пара),нагряване на различни видове газове, индукционни катализатори за гориво на дизелови двигатели [2], при добиване на нефт и транспортиране на нефтени продукти, индукционното нагряване на вода може да се използва при индукционен нагриващ бойлер за баня или отопление на жилище и други.

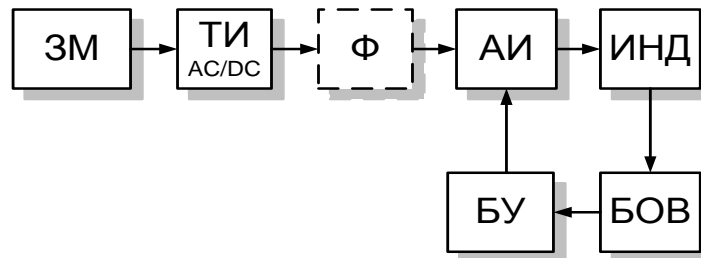
През последните години нараства използването на индукционното нагряване на флуиди, поради редица преимущества пред традиционните /конвенционални/ методи за нагряване състоящи се в:

- ❖ Разпространението на топлината в метала, който се нагрива от индукцията става много по-бързо (с по-голяма стръмност) отколкото при конвенционалните, което съществено намалява времето за нагряване .
- ❖ Нагриващата повърхност е много голяма, което води до хомогенно нагряване в целия обем на флуида.
- ❖ Температурният обхват на регулиране на нагривания флуид в тръбопровода е много широк.
- ❖ Поради високата плътност на мощността индукционните инсталации са компактни по размери.
- ❖ Не образува котлен камък, което увеличава жизнения цикъл на цялата инсталация.
- ❖ Има възможност да работи във вакуум или във всякакви среди.

Индукционното нагряване на флуиди има и недостатъци:

- Усложнена механика на ексченджера/топлообменник/.
- Възможност от електромагнитно замърсяване, както на захранващата мрежа, така и близкото пространство.

2. Блоквата схема на източник за индукционно нагряване на вода се състои от токоизправител (AC/DC) , инвертор (DC/AC) и блок за управление.



Фиг.3. Блокова схема на устройството

Захранващата мрежа (ЗМ) може да бъде еднофазна или трифазна. За битови нужди при консумирани мощности до 10kVA обикновено се използва еднофазна мрежа. Токоизправителят (ТИ) е безтрансформаторен, реализиран по схема “Грец”. Филтърът (Ф) намалява пулсациите на изправеното напрежение в зависимост от потребностите на товара.

Основни блокове в системата за индукционно нагряване на флуиди са автономния инвертор (АИ) и индуктора (Инд).

Важно е търсенето на оптимално съгласуване на преобразовател-товара(индуктор).

3. Индуктора, като товар на автономния инвертор

Той се състои от индукционна бобина и нагряващ елемент. Сърцевината, която се нагрява може да е с различна форма според приложението и вида на самото нагряване:

нагряване на цялото тяло; повърхностно нагряване; локално нагряване; нагряване на сърцевина във флуид. Зависи и от химическите и физическите характеристики на материала който се нагрява.

Най –често използваните индуктори представляват медна навита тръбичка. Най-простите конфигурации съдържат една или повече навивки, които обвиват материала, който ще се нагрява. В зависимост от приложението му индуктора може да има различна форма и размери. Обикновено индуктора се прави от мед, като се контролират само електрическите загуби.

Много е важна конструкцията на индуктора. Трябва много внимателно да се имат предвид следващите съображения:

- за индуктор се използва материал с малко съпротивление, обикновено се използва електролитна мед;
- използва се индуктор с малко разстояние между навивките;
- осъществява се добра връзка между индуктора и товара (ограничава се въздушната междина, индуктора се прави достатъчно дълъг).

Индукционното нагряване е ефективен безконтактен метод за произвеждане на топлина от загуби на проводимостта получени от въздействието на двете свойства:

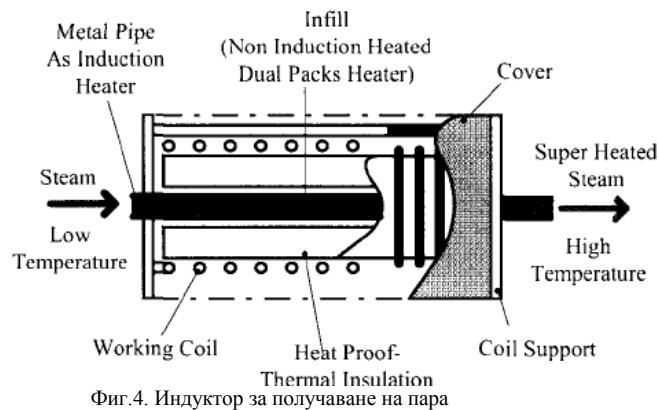
- индуцирани вихрови токове- нарастват с честотата и са незначителни при много ниски честоти;

- хистерезисни загуби в работния материал на базата на високочестотни редуващи се магнитни полета, които могат да се произвеждат от високочестотен инвертор и изчезват при много слаба сила на полето. Високочестотното магнитно поле обикновено се създава от спирална бобина, навита около работен материал или от плоска листовка бобина, поставена паралелно близко до работната повърхност.

Водата протича като еднородна маса при ниски температури и прави индуктора с непроменливи параметри/ товара на инвертора е постоянен/. В литературата не са посочени данни за изменение параметрите на индуктора при изменение на температурния диапазон в по-широки граници при протичане на флуиди. Над тази температура 80°C водата започва да ври /съдържанието на въздух и водни пари нараства / става нехомогенна/ и могат да се получат така наречените въздушни възглавници, които силно нарушават целия процес на топлоотдаване и от там товара става непостоянен.

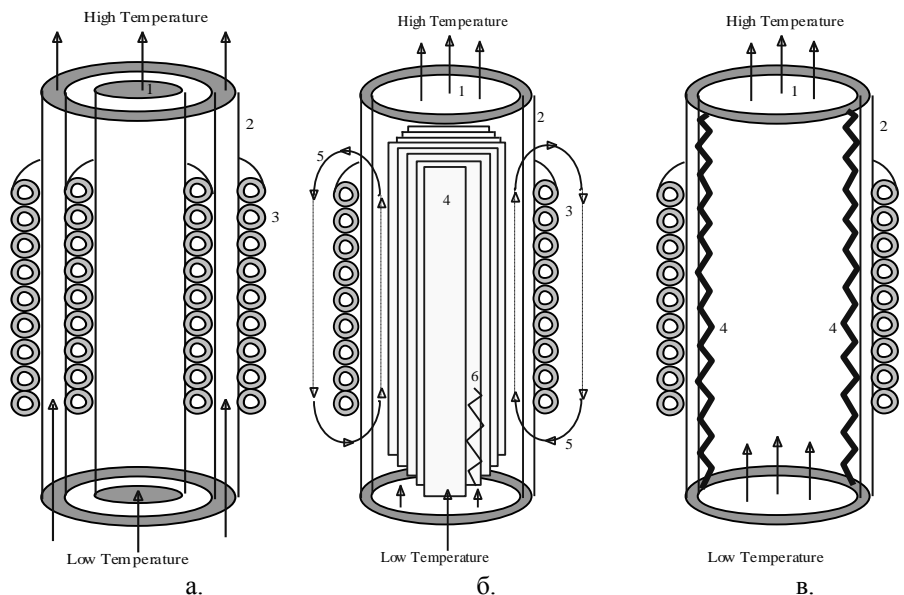
3.1. Конструкция на индуктори за нагряване на флуиди /вода/:

При устройства за нагряване на флуиди нагряващия елемент е метална тръба, в която се преобразува електромагнитната енергия в топлинна и чрез топлообмен се отдава на работния флуид. От конструкцията на индуктора и от неговата индуктивност зависи изборът на работна честота.



3.2. Подобрени конструкции на индуктори за нагряване на флуиди /вода/:

На фигурите следващи по-долу се представя развитието на няколко вида метални конструкции, служещи за нагряване от вихровите токове, които могат да се поставят вътре в неметален съд. На фиг.5 а е показан индуктор с две тръби, между които се движи водата и две индукционни намотки, които обхващат двете страни на тръбите за превръщане на по-голяма част от електромагнитната енергия в топлина.



Фиг.5.Разновидности на конструкции на топлообменници

На фиг.5.б е показан индуктор, представляващ неметална тръба с метални пластини, които преобразуват електрическата енергия в топлинна за турбулентно преминаващата вода. На фиг.5.в е показан индуктор с индукционна бобина навита върху тънкостенна тръба и грапава вътрешна повърхност, която увеличава контактната площ на водата с нагревателния елемент. При този индуктор съществува разсейване на електромагнитна енергия във вътрешността извън водата.

Металната структура е със специална повърхност, в която се индуцират вихрови токове и е поставена в цилиндъра на метален съд. Работната бобина е върху неметален съд и е свързана с високочестотно АС мощно захранване /инвертора/.

Нагриването на флуиди основано на ел.магнитна индукция нагриваща топлообменника се разделя на два вида:

- тръбопроводната стена, която се нагрива;
- пакет от тръби, които се нагриват през тях преминава флуида.
- пакет от сърцевина, която се нагрива обтичана от флуида.

Този метод е много атрактивен за авторите. Вихровите токове се индуцират през течащия флуид в металния пакет, поставен в неметален съд и се нагрива от външно поставена бобина, свързана с високочестотен резонансен инвертор. Специално е конструиран цилиндричен метален пакет за да се постигне нагриване чрез вихрови токове, който е поместен в неметален съд. Работната бобина се захранва от резонансен инвертор и генерира високочестотни колебания, които се разпростират около неметален съд и нагриват сърцевината. Този уред е осмислен за нагриване на флуиди, които протичат през неметален съд и се доставят в завода, като загрялата енергия се съхранява /задържа/ в специален топлообменник в системата на тръбопроводите.

От блоковата схема на фиг.3 се виждат останалите основни блокове на преобразувателя.

Токоизправителят, който се използва е пригоден за директно свързване към мрежата . Схемите, които са пригодени за такова приложение са еднофазен

двуполупериоден изправител /мостова схема/ и трифазен двуполупериоден изправител /мостова схема/;

4. Инвертора

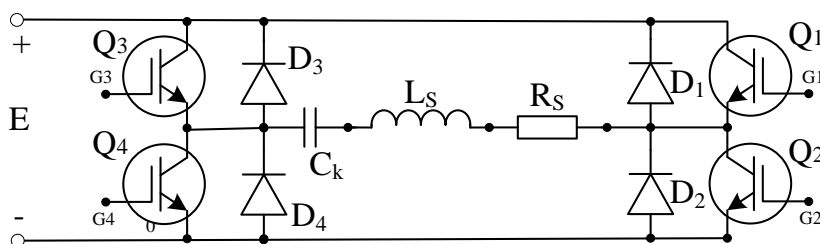
Авторите, прилагачи индукционно нагряване на флуиди предпочитат резонансен инвертор от последователен тип.

Параметри по които се избират конверторите:

- Честотни конвертори с тиристори: Кпд 90÷97%, честотен обхват 100Hz÷10kHz, обхват на мощност над 10MW;
- Честотни конвертори с транзистори: Кпд 75÷90%, честотен обхват до 500kHz, обхват на мощност до 500kW;
- Честотни конвертори с вакуумни прибори: Кпд 55÷70%, честотен обхват до 3000kHz, обхват на мощност до 1200kW.

Автономният инвертор преобразува постоянното напрежение от токоизправителя в променливо с подходящо напрежение и честота. За индукционно нагряване намират приложения и трите вида инвертори:

- ✓ При ниски честоти по-голямо приложение намират инверторите на ток.
- ✓ При високи честоти по-голямо приложение намират резонансните и квазирезонансни инвертори.
- ✓ При подходящо подбрана схема и индуктор е възможно безтрансформаторно свързване на индуктора.



Фиг.6. Мостова схема

Тези видове приложно ориентирани резонансни инвертори, използвани в мощните уреди за индукционно нагряване могат да работят в широк честотен диапазон от 20 KHz до 500 KHz и нагоре.

Еднофазен мостов инвертор подава високочестотна енергия към бобина (индуктора), която я прехвърля към метална структура с голяма повърхност за нагряване и се поставя в неметален тръбопровод. Нагряването на флуида вътре в тръбопровода, в съда или цистерната е пригоден за електромагнитно нагряване на флуиди и се използва в индустрията, химията, медицината или за домашно приложение.

В много случаи при нагряване на флуиди се изисква регулиране на изходната му температура.

Зависимостта на промяната на температурата на флуида от изходната мощност [1]:

$$(5) \quad P_o = \Delta m \cdot C_p \cdot (T_o - T_i) \quad [\text{kW}]$$

където: Δm – дебит на водата kg/s (4l/s)

C_p – атмосферно налягане по линията на насищане по линията kJ/kg.K
(4,18 kJ/kg.K)

T_o – изходна температура К; (293 К)

T_i – входна температура К; (323 К)

Разработват се нови концепции на ел.магнитно индукционно нагряване на флуиди, на оновата на ВЧ резонансни и квазирезонансни инвертори с IGBT модули с фазово регулиране-PWM и схема за PFC.

Използват се различни методи за регулиране на изходната мощност, а от там и на изходната температура на флуида се реализират чрез промяна на ширината на управляващия импулс ($D=tu/T$), както серийно и паралелно кондензаторно-компенсиране на товара.

По-нататъшното развитие на източници за индукционно нагряване на флуиди се насочва към усъвършенствувание на схемите за управление, с цел подобряване на техните енергетични показатели, а също така и получаване на електромагнитна съвместимост в работата на преобразователите в токозахранващата мрежа. Необходимо е и да се усъвършенства и конструкцията на топлообменника (индуктора) за най-добро и пълноценно топлоотдаване и от там повишаване на топлинното КПД.

Литература:

- [1] Morita S., Kanbe A. and Nakaoka M. "Innovative Development of Elektromagnetic Induction - based Fluid Heating Resonant PWM Inverter with Power Factor Correction Scheme", Power Electronics 23-25 september 1996 Conference Publication)429, IEEE 1996
- [2]. Nakaoka M., Yamamoto M., Iseki T., Bin G., "Latest Elektromagnetic Induction-based Fluid – Heating Equipment using High-Frequency PWM Load Resonant Inverter", PEDS'97 International Conference, IEEE 1997
- [3]. Hiroyuki Ogiwara, Biswas satyendra Nath, Mutsuo Nakaoka " Instantaneous Current Vector Control – Based Soft – Switched High-Frequency Resonant Inverter Using Static Induction Transistors for Induction -heating Power Supply ", IEEE Catalogue № 95TH80250-7803-4/95, IEEE 1995