

ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ - ВАРНА

инж. Даниела Жекова Марева

ИНВЕРТОР ЗА ИНДУКЦИОННО НАГРЯВАНЕ НА ФЛУИДИ

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

**на дисертация за получаване на образователна и
научна степен “Доктор”**

**Научни ръководители:
проф. д-р инж. Венцислав Цеков Вълчев
доц. д-р инж. Димитър Димов Юдов**

Варна, 2015 г.

ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ - ВАРНА

инж. Даниела Жекова Марева

ИНВЕРТОР ЗА ИНДУКЦИОННО НАГРЯВАНЕ НА ФЛУИДИ

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

**на дисертация за получаване на образователна и
научна степен “Доктор”**

**Научни ръководители:
проф. д-р инж. Венцислав Цеков Вълчев
доц. д-р инж. Димитър Димов Юдов**

Рецензенти:

- 1.**
- 2.**

Варна, 2015 г.

Дисертационният труд е обсъден на заседание на катедрен съвет на катедра “Електронна техника и микроелектроника“ при ТУ Варна на 24.11.2015 г.

Докторантът работи като асистент в Център по информатика и технически науки при Бургаски свободен университет, където са проведени основните теоретични и експериментални изследвания по дисертацията.

Автор: **инж. Даниела Жекова Марева**

Заглавие: **„Инвертор за индукционно нагряване на флуиди“**

Дисертационният труд съдържа **186** страници, включително **242** фигури, **14** таблици и **1** приложение,

оформени в 4 глави, общи изводи и списък на използваната литература от **132** заглавия, от които **57** на кирилица и **75** на латиница.

Означенията на фигурите и формулите в автореферата съвпадат с тези от дисертацията.

Защитата на дисертационния труд ще се състои наг. от часа в.....на открито заседание на жури сформирано със заповед на Ректора №...../.....г.

Материалите по защитата (дисертацията, рецензията и становищата) са на разположение на интересуващите се във ФД „Докторанти“, стая.... НУК.

ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

Все по-бързото развитие на технологиите, нарастващото очакване на потребителите за енергийна ефективност стимулират научно-изследователските лаборатории и производителите да полагат огромни усилия и средства за развойна дейност, да удовлетворяват търсенето и да са водещи сред огромната конкуренция.

Индукционното нагряване е метод за непряко нагряване на вещества, към които може да се отнесат и флуидите. Развитие на силовата електроника позволява да се разработят нови по-ефективни и икономически по-изгодни системи за нагряване с особен интерес в областта на промишлени, медицински, химически процеси и домашни уреди за преработка, използващи такъв вид топлинна енергия.

Динамиката на промените в областта на електрониката поставя като основна задача търсенето на пътища за подобряване на качествата и параметрите на битовите и промишлени системи за индукционно нагряване.

Проблем

Състои се в избор на подходящ индуктор, при който да се постигне максимално отдаване и преобразуване на енергията от електрическа в електромагнитна и оттам в топлинна. Преобразувателят, захранващ индуктора да притежава необходимите енергетични характеристики.

Цел и задачи на дисертационния труд

Целта на дисертационния труд е анализиране и изследване на система за индукционно нагряване на вода и оценяване на възможностите за регулиране на температурата на водата в работни условия.

Във връзка с целта са формулирани следните задачи:

1. Анализиране на основните принципи на въздействие на електромагнитното поле върху процеса на нагряване на метали.
2. Анализиране на конструкциите, качествата и особеностите при работа на индуктори за различни приложения.
3. Изследване и анализиране на различни схеми на преобразуватели за индукционно нагряване.
4. Разработване на методика за електрическо и конструктивно проектиране на индуктор за нагряване на вода за домашен индукционен бойлер.
5. Разработване на методика за електрическо проектиране и изследване на DC/AC преобразувател за индукционно нагряване за домашен индукционен бойлер.
6. Проучване на възможностите, изследване и сравняване на методите за регулиране на температурата на индукционен проточен бойлер, чрез въздействие на силовите преобразуватели.

Обект и предмет на изследването

В настоящия дисертационен труд е разгледана и анализирана система за индукционно нагряване на вода, приложима за проточен бойлер. Методите за проектирането и изследването и.

Методи на изследване

Работата по изпълнение съдържа проучване на световния опит и анализ на получените резултати. Използвани методи са: симулационно изследване; експериментално изследване; верификация на получените резултати.

Научна новост на изследването

Научната новост се състои в избор на подходящ индуктор, при който да се постигне максимално отдаване на топлина. Направената методика дава възможност да се проектират индуктори с предназначение за нагряване на флуиди. Заместващата схема изобразява характера на товара на инвертора и позволява изследването и чрез симулации. Проектирането на подходяща схема на инвертор дава възможност за постигане на подобрени енергетични параметри на цялата система. Чрез избраното регулиране се постига необходимата температура, подходящия режим на работа на инвертора и подобрените му енергетични параметри.

Практическа ценност на изследването

Създадените методики на проектиране, методите за симулация и доказалият ефективната си работа LLC резонансен инвертор ще намерят приложение в бъдещи изследователски и практически инженерни проекти. Предложената опитна система притежава елементи на практическа новост и може да се използва за бъдеща изследователска работа. Установи се, че в голяма част от проведените симулационни експерименти се получават оценки, близки до истинските стойности на параметрите на провежданите изпитвания.

Апробация на изследването

Основните резултати от проведените изследвания в дисертацията са докладвани и обсъдени на научни форуми, национални и международни конференции: XVI-th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies, SIELA 2009, Bourgas, Bulgaria; The XIX и XX International conference „ELECTRONICS ET'2010-11", Sozopol, 2010-11; Трети международен научен конгрес „50 години ТУ- Варна", 04-06 октомври, ТУ Варна; The XXII International conference „ELECTRONICS ET'2013", Sozopol 2013, Annual journal of Electronics, 2014 IEEE, XVIII-th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies, SIELA, 29-31 may, 2014

КРАТКО СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

I. ГЛАВА. СИСТЕМИ ЗА ИНДУКЦИОННО НАГРЯВАНЕ НА ФЛУИДИ

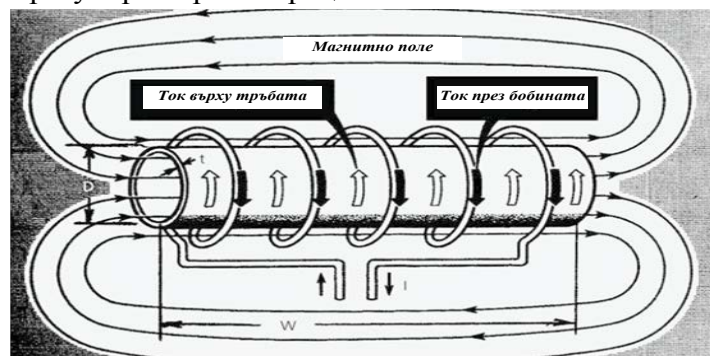
Извършен е преглед и анализ на теоретичните и експериментални изследвания в областта на индукционното нагряване и е направена класификация на видовете индукционно нагряване. Извършена е оценка на основните предимства и недостатъци на индуктори и инвертори, на нерешените проблеми, в резултат на което са формулирани целта и задачите на дисертационния труд.

Принципите на индукционното нагряване са основно базирани на два физически феномена: Електромагнитна индукция и Ефект на Джаул. Топлинното въздействие на тока се характеризира с количеството топлина, отделена в даден проводник, по който тече ток.

По закон на Джаул-Ленц: (1.1) $Q_E = I^2 \cdot R \cdot t, [J]$

Методът на индукционно нагряване се основава на свойството на електромагнитната индукция, да предава електромагнитна енергия в нагряваемия обект безконтактно. Токовете, индуцирани по повърхността на феромагнитни материали, намиращи се под влияние на променливи магнитни полета (*токове на Фуко*) загряват металните детайли.

Индукционното нагряване на флуиди е безконтактно преобразуване на електрическата енергия в електромагнитна, при което се генерира 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. Бобината е навита от немагнитен меден проводник, който се увива около работния детайл или е поставен успоредно на работната повърхност, която ще се нагрява. Получената топлина се отдава на избрания флуид и го подгръва до необходимата температура, като този процес може да се регулира бързо и прецизно.



фиг.1.24а. Схема на обикновен индуктор

Класифицирани са показателите, определящи характера на индукционното нагряване, консумираната енергия, количеството или обема на нагряваното вещество, заобикалящата среда и ограниченията при използването им.

Формирани са два критерия за оценка на системите за индукционно нагряване на вода:

- η_e - електрически коефициент на полезно действие на индуктора:

$$(1.16) \quad \eta_e = \frac{P_o}{P_o + P_z} = \frac{1}{1 + \frac{d_2 \cdot h_2}{b_1 \cdot h_1 \cdot F_1} \cdot \left(\frac{\rho_1}{\mu_r \cdot \rho_2 \cdot f} \right)}$$

- η_T - термичен коефициент на полезно действие :

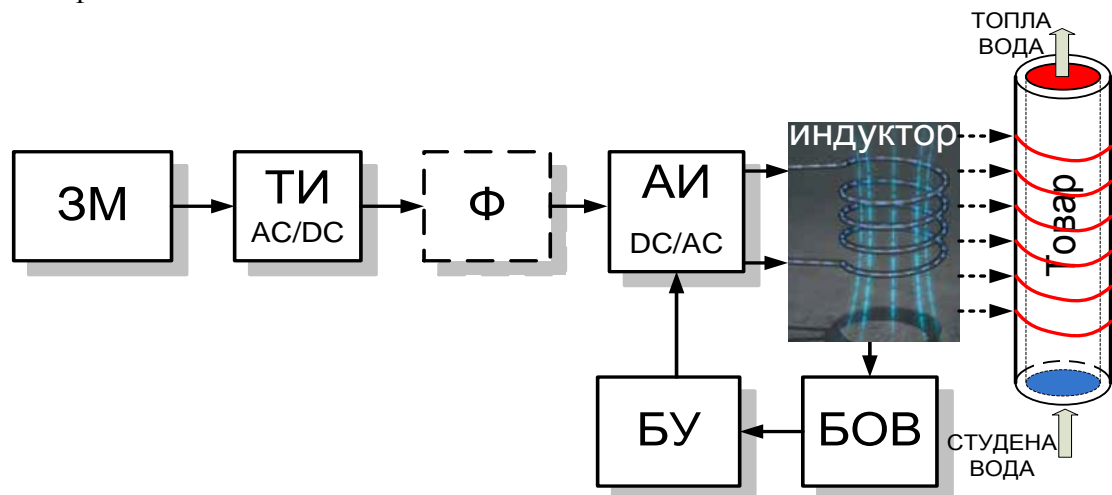
$$(1.17) \quad \eta_T = \frac{1}{1 + \frac{d_1}{d_2} \left(1 + 2 \cdot \pi \cdot \frac{\Delta^2}{d_2^2} \right) \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_2 \cdot \mu_r}}}$$

При направения обзор на индуктори в системи за индукционно нагряване на флуиди са анализирани двете основни приложения: в бита и в промишлеността – за индукционни

котлони и проточни бойлери. Въз основа на това са посочени недостатъците на всяка конструкция и положителните тенденции. В повечето случаи се констатира непълно използване на електромагнитното поле и недобро топлодаване между металната конструкция и водата, която отнема тази топлина. От разгледаните специализирани видове индуктори са избрани тези с технологични предимства, независимо от тяхната по-сложна конструкция. В зависимост от тяхното специфично приложение, като топлообменници са използвани пакет от пластини или метални патрони. Свързването на многозвенните индуктори дава възможност за степенно регулиране на мощността. При малки дебити и за постигане на високи температури се използва последователно свързване и паралелно свързване при необходимост от по-голям дебит на флуида, който трябва да се подгръва.

В системите за индукционно нагряване на вода се използват различни по конструкция индуктори. Ако се използва тръба, тя е тънкостенна - нагрява се повърхността на стената. Ако се избере сърцевина, обтекаема от флуид, тя се отдалечава от индуктора и това налага по-дълбочинно нагряване. Използването на пакет от тънкостенни пластини или тръбички, които се нагряват, повишава топлоотдаването. Достигането на зададена температура се реализира в сравнително тесен температурен диапазон. Предвижда се да се работи с повърхностно нагряване на малка дълбочина (съответно на висока честота).

Блоквата схема на източник за индукционно нагряване на вода в най-общия случай е показана на фиг.1.49.



фиг.1.49. Блокова схема на устройството

Захранващата мрежа (ЗМ) може да бъде еднофазна или трифазна. Проблемни блокове в системата за индукционно нагряване на флуиди са автоматният инвертор (АИ) и индукторът (Инд.), който се явява товар на автономния инвертор. Автономният инвертор преобразува постоянното напрежение от токоизправителя в променливо напрежение, съобразно изискванията на индуктора. Изборът на инвертор зависи основно от типа на товара и необходимата изходна мощност. За битови нужди инверторите за индукционно нагряване са с мощност до 10 KW, а товарът обикновено е индукторът, навит върху тънкостенна метална тръба.

В практическите схеми се използват еднотактни и двутактни инверторни схеми за индукционно нагряване на вода.

От направения обзор се правят следните заключения:

1. Разгледаните физически ефекти са основата за избора на индукционното нагряване. Предвижда се да се работи с повърхностно нагряване на малка дълбочина (съответно на висока честота). Топлинната енергия се отнема от нагрятата метална повърхност на тръба от движещия се в нея флуид, достига се необходимият му температурен диапазон и времето за достигането му.

2. В СИН се използват различни по конструкция индуктори. Ако се използва тръба, тя е тънкостенна. Ако се избере сърцевина, обтекаема от флуид, тя се отдалечава от индуктора и това налага по-дълбочинно нагряване. Използването на патрон (пакет от пластини или тръбички), повишава топлоотдаването. Предимства имат индуктори от патронен тип и индуктори с магнитопроводи. При тях се реализира по-пълно използване на елекромагнитната енергия и по-добро топлоотдаване. По-добро регулиране на температурата се получава при секционно свързване (стъпково регулиране). Недостатъци на посочените индуктори: по-сложна конструкция и нееднаква температура на повърхността и във вътрешността.

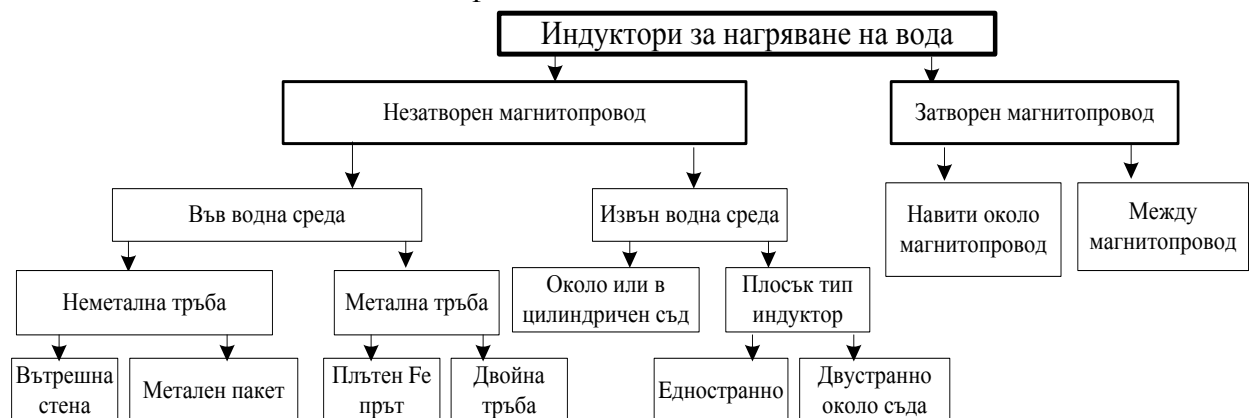
3. При индукционните котлони еднакво успешно се използват еднотактни и двутактни схеми на резонансни инвертори. При схема с паралелен резонансен кръг, се използва резонансен инвертор със затворен вход, който има по-устойчив режим на работа при промяна на товара.

4. За индукционно нагряване в проточен бойлер намират приложения трите вида инвертори. При ниски честоти приложение намират инверторите на ток. При високи честоти - резонансните и квазирезонансни инвертори. В много схеми се използва безтрансформаторно включване, защото е възможно съгласуване на товарното съпротивление на индуктора с напрежението, получавано в диагонала му.

II. ГЛАВА. ИНДУКТОРИ ЗА НАГРЯВАНЕ НА ФЛУИДИ

Направена е класификация на индукторите за нагряване на флуиди, според параметри и конструктивно оформление. Синтезирана е методика за тяхното проектиране. Направена е еквивалентна заместваща схема, отговаряща точно на такова приложение, за да се отчете съгласуването на индуктора с цялата система за индукционно нагряване. Определено е и еквивалентното съпротивление на системата. Въз основа на получените зависимости са направени математически симулации и са изчислени два иновативни вида индуктора.

На базата на направения обзор на индуктори за индукционно нагряване на флуиди може да се покаже следната класификация:



фиг.2.1. Класификация на индуктори за нагряване на вода

2.3. Проектиране на индуктор:

С помощта на допускания, които са въведени и избор на опростен модел е предложена методика за изчисление на параметрите на индуктор, приложим при индукционно нагряване на вода. Проектирането се състои от:

1. Изходни данни за проектиране:

За изчислението на индуктор за индукционно нагряване на вода се задават отправните - начални параметри: q_w - дебит на водата - $q_w = (0,1 \div 0,2)$ l/s в битовата водопроводната мрежа;

$T_i = 20^\circ\text{C}$ - температура на водата на входа на системата;

$T_o = 50^\circ\text{C}$ - температура на водата на изхода на системата;

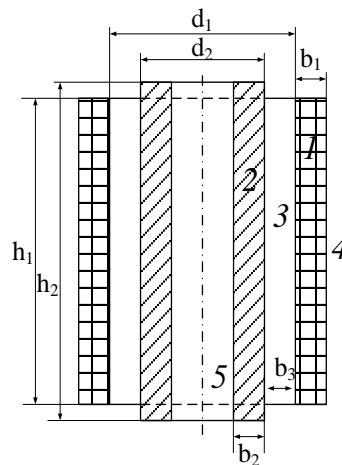
$U_i = 230\text{V}$ - захранващо напрежение от мрежата.

2. Определяне на необходимата **изходна мощност** за нагряване на водата до необходимата температура. Тя се осигурява от инвертора и се подава на бобината-индуктор [7].

$$(2.1) \quad P_o = q_w \cdot c \cdot \Delta T = q_w \cdot c \cdot (T_o - T_i) [\text{kW}]$$

3. Избор на габаритни размери на индуктора

На фиг.2.3 е показан чертеж на класически индуктор, приложим за нагряване на вода, 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 от външната страна на индуктора;
- 5 - въздушно пространство в стоманената тръба (товар).

фиг.2.3. Цилиндрична електромагнитна ситема индуктор - товар, симетрична по оста

➤ Определяне на диаметъра на тръбата:

$$(2.2) \quad d_2 \geq 0,2 \cdot \sqrt{\frac{q_w}{5 \cdot \pi \cdot v}}, \quad [\text{m}]$$

➤ Определяне на дебелината на тръбата - b_2 :

Налягането на водата е $(1 \div 6)$ атмосфери - превърнато в bar е $(1,01 \div 6,0795)$ bar.

➤ Изчисление на дълбочината на проникване на електромагнитните вълни в повърхността на тръбата (водосъдържателя)[32]

Дълбочината на проникване в настоящия случай се избира да е $0,2 \div 1$ от общата дебелина на тръбата $\Delta = (0,2 \div 1) \cdot b_2$

➤ Дължината на индуктора h_1 - приема се равна на дължината на нагрявания детайл.

Дължината на индуктора е $(\frac{h_1}{d_1} < 1)$. При тръба се приема $1,0 \cdot h_1 < h_2 < 1,5 \cdot h_1$.

Въз основа на израза от (2.4) се извежда- h_1 :

$$(2.5) \quad h_1 = \frac{t_n}{s_2 \cdot \gamma_2} = \frac{4 \cdot t_n \cdot q_w}{\pi \cdot d_2^2}, \quad [\text{mm}]$$

➤ Определяне на дължината на тръбата h_2 , обхваната от магнитното поле на индуктора. Избраната дължина трябва да осигури необходимото подгряване на водата, според избраната мощност.

$$(2.6) \quad h_2 = h_1 + (1 \div 2) \cdot d_2, \quad [\text{m}] \quad [131]$$

➤ Определяне на изолацията - b_3 - между индуктора и нагряваната тръба от таб. 2.2 Поставя се изолационен материал с дебелина $b_3 = (1 \div 10)$ mm.

➤ Вътрешният диаметър на индуктора d_1 :

$$(2.7) \quad d_1 = d_2 + 2 \cdot b_3 \quad [\text{m}]$$

4. Изчисление на **електрическите параметри** на индуктора

- Отделената специфична повърхностна мощност в товара е:

$$(2.9) \quad P_s = \frac{P_2}{\pi \cdot d_2 \cdot h_2} \left[\frac{\text{kW}}{\text{m}^2} \right]$$

Стойността на относителната магнитна проницаемост зависи от съдържанието на въглерод и от напрегнатостта на магнитното поле H (A/m). Приема стойности от $10 \div 1000$ при $H = (10^2 \div 10^5)$, [A/m]. Формулата на зависимостта на $\mu_r = f(P_s)$ е [32]:

$$(2.10) \quad \mu_{20} = \left(\frac{P_s \cdot 10^3}{H_{0m}^2 \cdot \sqrt{\rho_2 \cdot f}} \right)^2$$

- Обоснование за избора на резонансната честота на тока при индукционно нагряване на вода.

$$(2.11) \quad f_0 = \frac{503^2 \cdot \rho_2}{\mu_{20} \cdot \Delta^2} \quad [\text{kHz}]$$

- Изчисление на напрегнатостта на магнитното поле на повърхността на индуктора H_0 , [A/m] при индукционно нагряване по формулата [32]. Направено за индуктор - тръба:

$$(2.13) \quad H_0 = \frac{h_2}{k_4 \cdot h_1} \cdot \sqrt{\frac{503 \cdot P_0 \cdot 10^6}{\pi \cdot d_2 \cdot h_2 \cdot \Delta \cdot \mu_{20} \cdot f}}, \quad [\text{A/m}]$$

- Изчисление на напрежението върху индуктора - U_L - диагонала на моста

$$(2.15) \quad U_L = \frac{4E}{\pi \cdot \sqrt{2}} \quad [\text{V}]$$

- Изчисление на тока през индуктора - I_L

$$(2.16) \quad I_L = \frac{P_0 \cdot 10^3}{U_L \cdot \cos \varphi}, \quad [\text{A}]$$

- Изчисление на броя на навивките на индуктора - w_1 :

$$(2.17) \quad w_1 = \frac{H_0 \cdot h_1}{\sqrt{2} \cdot I_L}$$

- Изчисление на индуктивността на индуктора - L_k

Тъй като обемът на тръбата V_{2t} е около n пъти по-малък, в сравнение с този на плътната желязна сърцевина V_2 , това ще доведе до промяна на магнитна проницаемост μ_r , при използване на индуктивност с тръбна сърцевина. Поради тази причина се **въвежда коефициент на пропорционалност на обемите k_6** , отчитащ тази промяна:

$$(2.19) \quad k_6 = \frac{V_2}{V_{2t}}$$

При това приложение магнитната проницаемост μ_{rt} за конкретните размери на тръба придобива стойността $\mu_{rt} = \frac{\mu_r}{k_6}$. $\mu_r \geq 1$

В случаите когато $k_6 > \mu_r$ се приема $\mu_{rt} = 1$, което означава, че тръбата много слабо влияе на магнитната проницаемост и е равносилно на бобина без желязна сърцевина.

Коригирана е формулата от (2.18), като придобива вида за конкретното приложение:

$$(2.20) \quad L_k = \mu_0 \cdot \frac{\mu_r}{k_6} \cdot \frac{\pi \cdot d_1^2 \cdot w^2}{4 \cdot h_1} = \mu_0 \cdot \mu_{rt} \cdot \frac{\pi \cdot d_1^2 \cdot w^2}{4 \cdot h_1} \quad [\mu\text{H}]$$

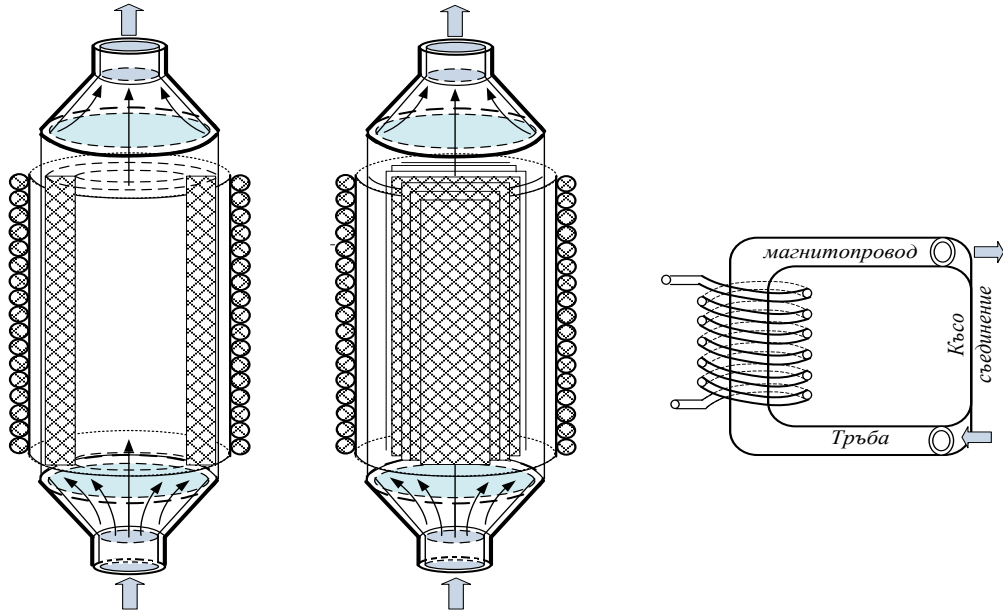
При заместване с получените данни във формула (2.20) се получава $L_k \approx 42 \mu\text{H}$.

За съгласуването на индуктора и инвертора е необходимо да се изследва влиянието на габаритните размери на индуктора върху стойността на неговата индуктивност.

6. **Еквивалентна заместваща схема на индуктора**

При индукционно нагряване металът изпълнява роля на вторична намотка, дадена накъсо с определено електрическо съпротивление. Магнитопроводът е тръба и е предназначен за провеждане на магнитния поток с необходимото разпределение на магнитното поле в пространството и намаляне на магнитното съпротивление.

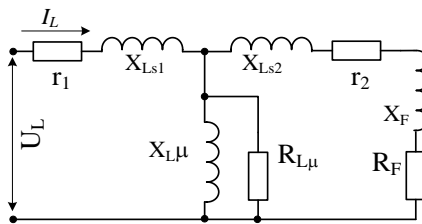
На фиг.2.9 са показани два основни типа топлообменници и тяхната електромагнитна заместваща схема на индуктора, [96].



фиг.2.9. Топлообменник с метална стена или патрон, поместен в неметална тръба и заместваща схема на индуктора в зависимост от разположението на сърцевината

Прави се заключението, че когато се използва индуктор метална тръба или неметална тръба, с поставен в нея метален патрон и навита върху нея бобина, заместващата схема се представя така, че вторичната намотка, изразяваща патрона е дадена накъсо.

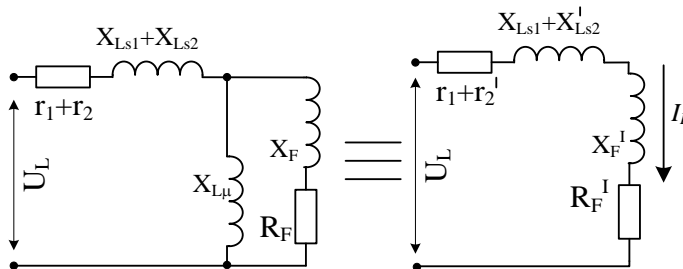
Заместващата схема, представлява тази на трансформатор от класически тип с определени допускания - показана е на фиг.2.10.



фиг.2.10. Схема на заместване на индуктор с метална сърцевина-тръба

- където: r_1 - активно съпротивление на бобината на индуктора (първичната намотка);
 X_{LS1} - реактивно съпротивление на разсейване на бобината-индуктор (първ.намотка);
 r_2 - активно съпротивление във вторичната намотка-тръба;
 X_{LS2} - реактивно съпротивление на разсейване във вторичната намотка-тръба;
 $R_{L\mu}$ и $X_{L\mu}$ - активно и реактивно съпротивление, определят се от съставящата на намагнитващите сили, преодоляващи магнитните потоци в пространството извън индуктора;
 R_F - активно съпротивление, отразяващо токовете на Фуко върху тръбата;
 X_F - реактивно съпротивление, отразяващо токовете на Фуко върху тръбата;

Като се и в предвид реалните стойности на отделните съставящи на заместващата схема на индуктора с метална тръба се реализират следните преобразувания на схемата (фиг.2.11):



фиг.2.11. Опростена схема на заместване на индуктор с метална тръба

където се изразява: R_F' - приведено към първичната страна активно съпротивление R_F ;
 X_F - приведено към първичната страна реактивно съпротивление X_F ;
 Пълното приведено съпротивление на тяло с крайна дължина се изразява с израза:

$$(2.25) \quad z_2^1 = \frac{U_L}{I_L} = \frac{j \cdot X_{L\mu} [R_F + j(X_{LS2} + X_F)]}{R_F + j(X_{LS2} + X_F + X_{L\mu})} = r_2' + j \cdot x_2'$$

От тук се получава зависимостта за r_2' и x_2' :

$$(2.26) \quad r_2' = c \cdot r_2 = w_1^2 \cdot \frac{\pi \cdot \rho_2 \cdot m_2^2 \cdot A}{h_2}, \quad [\Omega]$$

$$(2.27) \quad x_2' = c \cdot \left[X_{LS2} + X_F + \frac{(X_{LS2} + X_F)^2 + r_2'^2}{X_{L\mu}} \right], \quad [\Omega]$$

За вътрешно реактивно съпротивление на тръбата X_F , приведено към тока през нея се получава:

$$(2.29) \quad X_F = w_1^2 \cdot \frac{\pi \cdot d_2^2 \cdot \rho_2 \cdot m_2 \cdot B}{h_1 \cdot \Delta \cdot \sqrt{2}} = \frac{\pi \cdot \rho_2 \cdot m_2^2 \cdot B}{h_2} = R_F \cdot \frac{B}{A}, \quad [\Omega]$$

$$(2.30) \quad X_{LS2} = \omega \cdot \mu_0 \cdot \frac{S_h}{h_2} \cdot w_1^2, \quad [\Omega]$$

Реактивното съпротивление, което се определя от съставящата на намагнитващите сили, необходими за преодоляване на магнитните потоци в пространството извън индуктора е:

$$(2.32) \quad X_{L\mu} = X_{L0} \cdot \frac{k_5 \cdot h_1}{h_1 - k_5 \cdot h_2}, \quad [\Omega]$$

Реактивното съпротивление при индуктор без желязна сърцевина се получава от:

$$(2.33) \quad X_{L0} = \omega \cdot \mu_0 \cdot \frac{S_1}{h_1}, \quad [\Omega]$$

За настоящото приложение се допуска:

- $R_{L\mu}$ и $X_{L\mu}$ са много големи, поради отворения характер на магнитопровода
- X_F клони към нула, токовете на Фуко при нагряването имат активна съставна;
- r_2 може да се пренебрегне, защото е много малко;

За еквивалентните активно R_e и реактивно X_e съпротивления се получава:

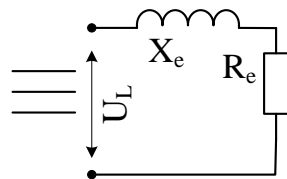
$$R_e = r_1 + r_2' + R_F'$$

след допускането израза придобива вида: $R_e \approx r_1 + R_F'$

$$X_e = X_{LS1} + X_{LS2}' + X_F'$$

след допускането израза придобива вида: $X_e \approx X_{LS1} + X_{LS2}'$

Въз основа на тези допускания след преобразувания се получава опростена схема с еквивалентни активно R_e и реактивно X_e съпротивления. Това дава възможност по-нататък да се опростят изчисленията и анализите, показани на фиг.2.13 и еквивалентната схема



приема вида:

фиг.2.13. По-опростена схема на заместване на индуктор с метална тръба

2.5. Изчисление на съпротивлението на индуктора

Съществуват определен брой конструкции на индуктори за нагряване на флуиди, но отсъства описание за пълно съгласуване на конструктивните размери на индуктора със захранващия преобразувател. Затова е необходимо да се определи неговото активно и реактивно съпротивления. [128]

Предложените еквивалентни заместващи схеми са за индукционно нагряване на метали. Необходимо е да се отчетат особеностите на загряването на различните флуиди.

Напрежението U_L на краищата на индуктора (фиг.2.10) се определя от общите изрази:

$$(2.35) \quad U_L = \frac{j \cdot \omega \cdot w_1 \cdot \Phi_L}{\sqrt{2}} = \frac{j \cdot \omega \cdot w_1}{\sqrt{2}} \cdot (\Phi_{LS1} + \Phi_B + \Phi_F)$$

където: Φ_L - амплитудна стойност на пълния магнитен поток на индуктора;

Φ_{LS1} - съставяща на магнитния поток, преминаваща през напречното сечение на намотката;

Φ_B - съставяща на магнитния поток, преминаваща през въздушна междина;

Φ_F - съставяща на магнитния поток, преминаваща през сечението на тръбата.

Съставящата на напрежението е равна на:

$$(2.36) \quad U_{LS1} = I_L \cdot w_1^2 \cdot z_1$$

За вътрешното електрическо съпротивление се получава :

$$(2.37) \quad z_1 = \frac{\pi \cdot d_1 \cdot z_{01}}{h_1}$$

Електрическото съпротивление на единичен квадрат на индуктора.

Изразява се чрез: (2.38) $z_{01} = \frac{\sqrt{2} \cdot \rho_1}{\Delta_1} \cdot e^{j-\frac{\pi}{4}}$

Електрическото съпротивление на индуктора, с w навивки, без въздушна междина е:

$$(2.39) \quad z_1 = w_1^2 \cdot \frac{\pi \cdot d_1 \cdot z_{01}}{h_1} = R_1 + j \cdot X_{LS1}$$

$$(2.40) \quad r_1 \approx j \cdot X_{LS1} = w_1^2 \cdot \frac{\pi \cdot d_1}{h_1} \cdot \frac{\rho_1}{\Delta_1} = w_1 \cdot \frac{\pi \cdot d_1}{b_5} \cdot \frac{\rho_1}{\Delta_1}, [\Omega]$$

$$(2.41) \quad U_{LS1} = I_L \cdot (R_1 + j \cdot X_{LS1})$$

$$(2.42) \quad U_B = I_L \cdot j \cdot X_B$$

Реактивно съпротивление X_B , определено от магнитния поток Φ_B е:

$$(2.43) \quad X_B = \pi^2 \cdot \mu_0 \cdot w_1^2 \cdot f \cdot \frac{(d_1^2 - d_2^2)}{h_1} [\Omega]$$

$$(2.44) \quad U_F = I_L \cdot w_1^2 \cdot z_2 = I_L \cdot w_1^2 \cdot (R_F + j \cdot X_F)$$

Активното R_F съпротивление на цилиндъра-тръба е:

$$(2.45) \quad R_F = \frac{\pi \cdot d_2}{h_1} \cdot \frac{\rho_2}{\Delta} [\Omega]$$

$$(2.46) \quad U_L = I_L \cdot (R_F' + j \cdot X_F')$$

$$(2.47) \quad U_L = I_L \cdot [(r_1 + r_2' + R_F' + j \cdot (X_B + X_{LS1} + X_F'))] \\ = I_L \cdot [(r_1 + R_F' + j \cdot X_{LS2})] = I_L \cdot Z_L$$

r_2' и X_F' - се пренебрегват

Реактивно съпротивление на разсейване на индуктора:

$$(2.48) \quad X_{LS2} = X_B + X_{LS1}$$

Необходимо е да се изчисли съставящата на напрежението U_F , която уравновесява ЕДН, предадено в индуктора от магнитния поток Φ_F , преминаващ навътре в нагреваемия цилиндър:

$$(2.49) \quad U_F = I_L \cdot (R_F' + j \cdot X_F')$$

където: R_F' - приведено активно съпротивление на тръбата;

X_F' - приведено реактивно съпротивление на тръбата, което е \gg за това не се използва;

$$U_F \approx I_L \cdot R_F'$$

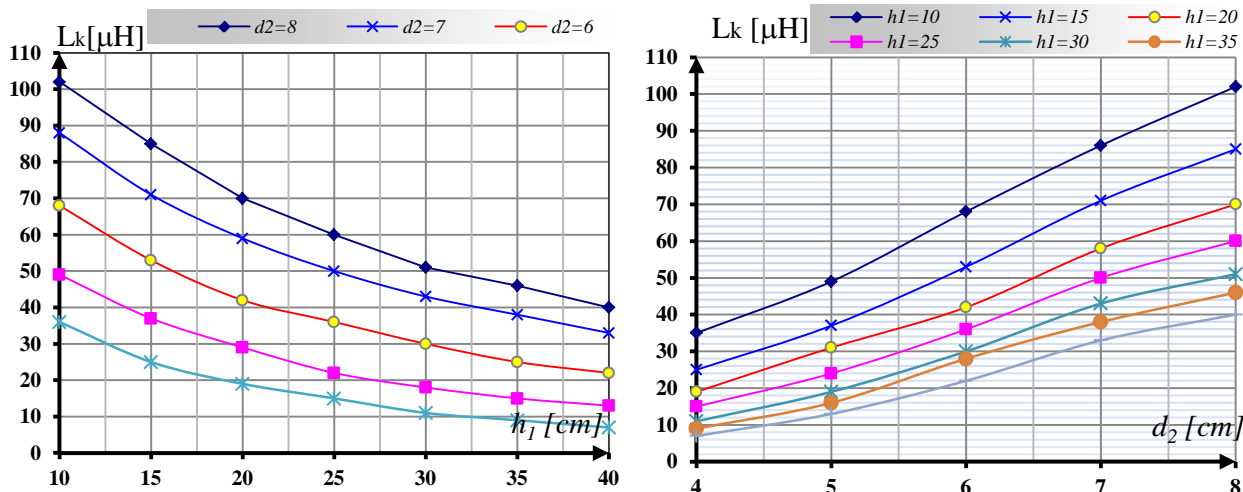
$$(2.50) \quad R_F' = w_1^2 \cdot \frac{\pi \cdot \rho_2 \cdot m_2^2 \cdot A}{h_1}, [\Omega]$$

В реалния случай за индуктор с крайната дължина и товар-тръба формули за активното R_{eT} и реактивното съпротивление X_{eT} на самата тръба са:

$$(2.53) \quad R_e \approx r_1 + R_F' [\Omega]$$

2.6. Математически изследвания на индуктора

Въз основа на получената формула за L_k (2.20) при изчисление на електрическите параметри на индуктора, са построени зависимости на нейното изменение, при промяна на различни параметри. Те представляват физичните габарити на самата тръба, върху която е навит индуктора, при неизменен брой намотки, които зависят от други параметри.



фиг.2.14. Зависимости на стойността на индуктивността на индуктора, при изменение дължината на бобината h_1 , за различни стойности на диаметъра на тръбата, фиг.2.15, при изменение на диаметъра на тръбата за различни стойности на дължината на бобината h_1

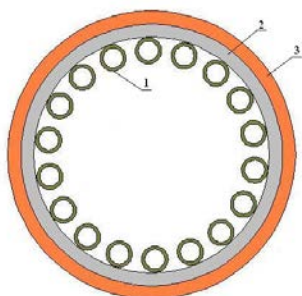
От фиг.2.14 се вижда, че за зададената мощност на системата за индукционно нагряване на вода, необходимата резонансна индуктивност се получава при различни диаметри на тръбата, като се избере съответната дължина на индуктора. Получената зависимост на фиг.2.15 показва, че желаната резонансна индуктивност се получава за няколко стойности на диаметъра на тръбата при съответни дължини на индуктора. От фиг.2.16 се вижда, че промяната на дебелината на изолацията не оказва съществено изменение на индуктивността на индуктора.

От получените резултати могат да се направят следните изводи: При нарастване на дължината на индуктора, намалява стойността на неговата индуктивност за константен брой навивки. С промяна на дължината на индуктора и диаметъра му, може да се постигне необходимата индуктивност, за да се съгласува с индуктивността на използвания резонансен инвертор. Така размерите на тръбата и индуктора могат да бъдат избирани според технологичните особености.

2.7. Изчисление на електрически параметри на два иновативни типа индуктори

➤ Специализиран индуктор- пакет от успоредни, разположени в кръг тръби

Разположени в кръг тръби - фиг.2.18. са обхванати от магнитното поле, което е максимално и е еднакво за всички.



- 1- система от тръби;
- 2- слой изолация;
- 3- бобина на индуктора.

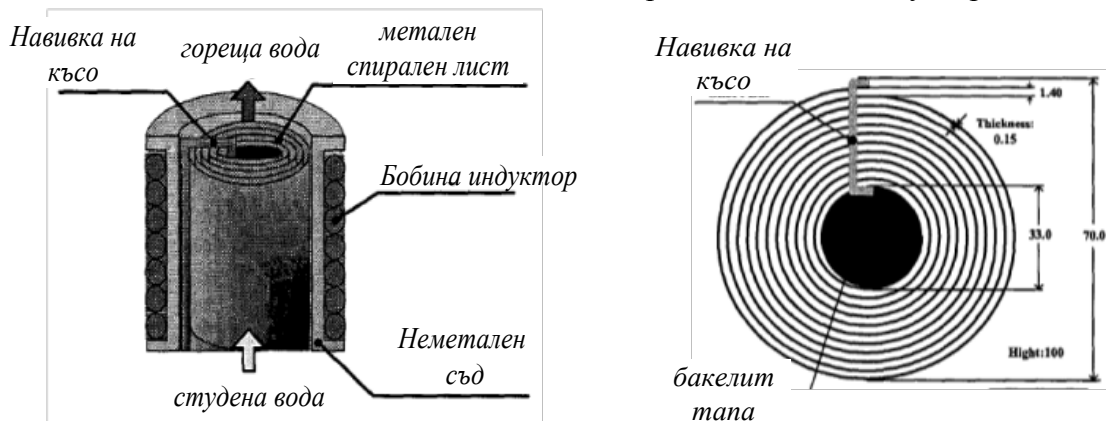
фиг.2.18. Индуктор с пакет от успоредно разположени в кръг тръби

Тръбите могат да се разполагат на един или няколко слоя. Връзката на електромагнитното с температурното полета в системата, се определя от зависимостта на специфичното съпротивление и магнитната проницаемост от температурата.

Въз основа на получените по-горе резултати се изчислява и идуктивността на индуктора по формула (2.20): $L_k = \pi^2 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{10,5}{10,36} \cdot \frac{0,07^2 \cdot 42^2}{0,350} \approx 17 [\mu H]$

➤ Специализиран индуктор-немтална тръба с навита на спирала метална сърцевина.

Друга модификация е индуктор върху неметална тръба, с навита на спирала метална сърцевина, с дадени накъсо навивки. Могат да се представят, като разположени един в друг цилиндри. Обхванати са от магнитното поле на цилиндрична бобина - индуктор.



фиг.2.19. Индуктор със сърцевина, навита на спирала листовата ламарина

От получените по-горе резултати се изчислява и индуктивността на индуктора по формула (2.20). $L_k = \pi^2 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{10,5}{10,36} \cdot \frac{0,070^2 \cdot 65^2}{0,350} \approx 189 [\mu\text{H}]$

Приносителите към II глава са:

1. Направена е класификация на индукторите за нагряване на флуиди и са определени предимствата и приложенията им. Анализирани са процесите за превръщане на електромагнитното поле в токове на Фуко и респективно нагряване на феромагнитен детайл.

2. Предложена е методика за изчисление на габаритните размери на индуктор. Изведени са математически зависимости на електрическите параметри на индуктора във функция от габаритните му размери. Изведена е зависимост на активното еквивалентно съпротивление на индуктор, отразяващо нагряващото действие на металната тръба от токовете на Фуко.

3. Изведена е зависимост за определяне на работна честота на електронния преобразувател във функция от габаритните параметри на тръбата на индуктора.

4. Предложен и въведен е коефициент k_6 (2.19) за коригиране на известна зависимост за изчисление на индуктивност на желязна сърцевина, в съответствие с използвания тръбен индуктор.

5. Предложена е еквивалентна заместваща схема на индуктор, подходяща за компютърна симулация на изследвани параметри на система електронен преобразувател - индуктор.

На базата на изведените зависимости са реализирани:

1. Определени са електрическите параметри на примерен индуктор, в съответствие с избраните му габаритни размери.

2. На базата на реализираната методика при изменение на получените зависимости са изчислени два вида специализирани индуктори.

III. ГЛАВА. ИНВЕРТОР ЗА ИНДУКЦИОННО НАГРЯВАНЕ НА ВОДА

За обоснован избор на резонансен инвертор са анализирани много схеми в три основни групи: еднотактни, двутактни - мостови и полумостови и с различен начин на включване на товара. С използване на сравнителен анализ са показани предимствата и недостатъците на

определените схеми. Схемите са изследвани при промяна стойността на някой от елементите или параметрите и е наблюдавана реакцията им. Изследвани са енергетичните характеристики. Изведени са математически зависимости за избор на елементите на схемата. Симулационно е изследвана предложената схема на LLC инвертор за индукционно нагряване на вода.

При избора на инвертор за индукционно нагряване на вода са определени (известни) параметрите на нагряваната вода по количество и време, което изисква необходима електрическа мощност.

Изходна мощност - $P_o=(3\div 10)\text{kW}$;

Работна честота - $f=(30\div 100)\text{kHz}$;

Захранващо напрежение на мрежата - $U_i=230\text{V}$ при еднофазни мрежи.

Направена е съпоставимост на работата на схемите на резонансни инвертори, използвани при индукционното нагряване на флуиди и се отнасят за случаи на нагряване на вода под 80°C , където отсъстват сериозни динамически натоварвания, при рязка промяна на товара. Изследването е извършено при еднаква стойност на индуктора и комутиращи реактивни елементи. Изследвани са формите на напреженията и токовете през индуктора.

➤ Резонансен еднотактен инвертор - *инвертор с отворен и затворен вход*

Формата на напрежението и тока през индуктора следва синусоидален закон, като при инвертора с последователен товар има изместване на части от синусоидалата. При паралелния инвертор придобива синусоидална форма с по-голяма стойност. Анализирани са енергетичните характеристики на двата инвертора. Консумираната мощност и отдадената в товара се изменят линейно в обхвата $\delta=0,8\div 0,88$, след което следват различен характер. Стръмността при последователния инвертор е по-малка и достига по-големи стойности. Отдаваната мощност при последователния инвертор има изразен екстримум при $\delta=0,9$, поради ясно изразен резонанс при тази стойност. При паралелния инвертор се получават по-малки стойности с плавно нарастващ характер. Загубната мощност при инвертора с паралелен товар е значително по-голяма, дължащо се на характера на паралелния трептящ кръг и е в приемливите граници. Коефициентът на полезно действие при мостовия инвертор с последователен товар е константен $\eta=0,9$ за целия диапазон на промяна на параметъра δ . При инвертора с паралелен товар η нараства линейно до стойност 0,45, след което η нараства стръмно до стойности около 0,8. По-добър коефициент на полезно действие има инвертора с последователен товар и през целия диапазон на регулиране е константен .

Изследвани са енергетичните параметри при изменение на работната честота f на двата еднотактни резонансни инвертора. По-малка чувствителност към изменение на работната честота и по-добри енергетични качества (η , P_z) има схема с отворен вход и е по-приложим в тези случаи.

➤ Резонансен инвертор - *полумостов и мостов инвертор*

За да се повиши изходната мощност и оттам, респективно температурата и количеството на нагряваната вода, логично е използването на двутактни инвертори за индукционно нагряване на вода, като полумостовата (HB inv) и мостова (FB inv) схеми.

Токът и напрежението през индуктора се изменят по близък до синусоидалата закон. Мощността, отдавана в товара е по-голяма при мостовия резонансен инвертор (4 пъти). Превключването на тока и напрежението върху транзистора е реализирано при нулеви стойности. Токът има полусинусоидална форма, а напрежението - правоъгълна форма. Мощността, отдавана в индуктора при мостовата схема е по-голяма при максималните им стойности (4 пъти). Токът през индуктора и през транзисторите е по-голям при мостовата схема (2 пъти). Токът през обратните диоди силно зависи от избрания режим на работа и в режим на максимална мощност се изравняват и приемат минимални стойности.

От направения анализ се избира мостова схема на резонансен инвертор за индукционно нагряване на вода. Най-подходящият режим на работа се получава при коефициент на запълване $\delta \approx 0,9$ и неговото регулиране.

➤ Резонансен мостов инвертор - *при различен характер на товара*

След като най-подходящата схема за разглеждания случай е мостов инвертор, се уточнява, какъв ще е характерът на товара в диагонала на моста. Чист индуктивен товар не се възприема, заради големите динамични натоварвания на транзисторите и повишените комутационни загуби.

При инвертор с паралелен товар формата на напрежението и тока през индуктора следва синусоидален закон с 50% по-голяма стойност, а при инвертора с последователен има изместване на части от синусоидалата. Токът през всеки от транзисторите при последователния товар има синусоидална форма, с паралелния товар е правоъгълна с 4 пъти по-малка стойност. Получената мощност върху товара е 4 пъти по-голяма с последователния товар. Превключването на тока и напрежението върху транзистора става при нулеви стойности. Консумираната мощност и тази, отдадена в товара се изменят линейно при $\delta=0,4 \div 0,8$, след което следват различен характер и при последователния товар и е 2,5 пъти по-голяма. Отдаваната мощност при паралелния товар е по-малка. Коефициентът на полезно действие е по-добър при мостов инвертор с последователен товар и е константен $\eta=0,9$ за целия диапазон на промяна на параметъра δ .

Изследвани са зависимости на мостови схеми с последователен и паралелен трептящ кръг за товар на инверторите, при промяна на комутацията кондензатор C_k . Отдадената мощност в товара при последователния има изявен максимум, а при паралелния тази мощност спада в много по-малки граници. Загубната мощност при последователния се променя в малки граници, докато при паралелния стръмно нараства до стотици ватове загуби. Коефициентът на полезно действие се изменя в границите от $\eta \approx 0,75$ за последователния, а при паралелния η е със спадащ характер и достига по-ниски стойности.

➤ *Последователно-паралелно (смесено) включване на индуктора с кондензатор*

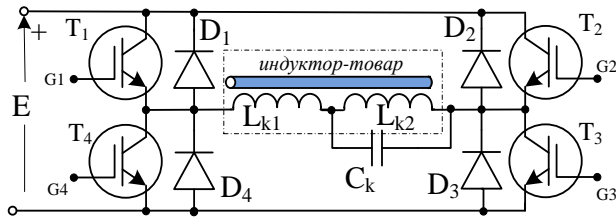
Използвайки предимствата на мостовите инвертори с товар последователен и паралелен трептящ кръг е синтезирана следващата схема с комбиниран последователно-паралелен товар. Индуктивността, представляваща индуктора на системата е разделена на две работни части. С всяка от тях е реализиран отделен трептящ кръг - съответно последователен и паралелен. Необходимо е оптимизиране на резонансната верига в диагонала на последователно- паралелен LLC резонансен инвертор, чийто товар са два последователно свързани резонансни кръга с различна честотна характеристика.

Представява интерес да се изследва схемата с кондензатора C_k - LLC и без кондензатор C_k - LLC инвертора наподобява инвертор с паралелен трептящ кръг и входна бобина, включена в променливотоковия диагонал. Формата на напрежението и тока през индуктора се изменят по ясно изразен синусоидален закон, като при едната бобина на индуктора има известно изместване на частите от синусоидалата. При LLC резонансен инвертор стойностите на токовете през бобините са с 40% по-големи, а напрежението със 17%. Токът през транзистора е по-голям с 50%. Получената мощност върху товара е по-голяма при LLC резонансен инвертор (с 60%). При една и съща стойност на индуктора и еднакво захранващо напрежение, по-голяма мощност се получава при LLC инвертор и има линейна графика на регулиране. Загубите в транзисторите при LLC инвертор са незначително по-големи, дължащи се на по-големия ток, протичащ през транзистора.

Изследван е и LLC резонансен инвертор с еднакво и *променено съотношение на двете бобини* $L_{ind} = L_{k1} + L_{k2}$, $c = 21\mu H + 21\mu H$ и $c = 19\mu H + 23\mu H$. Мощността в товара е по-голяма с около 700W при второто съотношение. Коефициентът на полезно действие на LLC резонансен инвертор при получена по-голяма мощност е по-голям (с 5%). От направения симулационен анализ на двете схеми на резонансни инвертори за индукционно нагряване

на вода, с по-добри енергетични показатели се утвърждава LLC инвертор. Най-подходящият режим на работа се получава при по-големи изходни мощности, където стресът на елементите е най-малък и коефициентът на полезно действие е най-висок.

При оптимизацията на схемата на резонансния инвертор за индукционно нагряване на флуиди, индукторът е разделен на две части - обединявайки последователната и паралелна индуктивности. Изработва се с допълнителен (среден) извод, като двете бобини са разположени върху различни части от тръбата (фиг.3.49), с което се реализира слаба магнитна връзка между тях. Реализирана е комбинация от последователен и паралелен резонанс, като през кондензатора не минава цялата енергия в диагонала на инвертора.



фиг.3.49. Принципна схема на изследвания инвертор

Наличието на кондензатор, паралелно включен на част от индуктора, прави инверторът с мека комутация по ток. Средната стойност на тока в диагонала на инвертора за изчислената мощност на индуктора в глава II е от порядъка (25÷49)А, а при полумостовия инвертор стойностите са два пъти по-големи, което изисква и по-големи възможности за охлаждане и по-скъпи транзистори. Тези показатели налагат избора на мостова транзисторна схема.

3.2. Извеждане на математически зависимости за избор на елементите на схемата

Изходните данни за електрическото проектиране на инвертора са:

- дебит на нагряваната вода - q_w [l/s];
- температурна разлика на водата на изхода и на входа на индуктора ΔT [°C];
- вид на захранващото напрежение - U_2 [V].

Ред за проектиране на инвертора:

1. Определяне на необходимата мощност на инвертора [7]:

$$(2.1) P_o = q_w \cdot c \cdot \Delta T = q_w \cdot c \cdot (T_o - T_i) \text{ [kW]}$$

2. Захранващото напрежение на инвертора е:

$$(3.1) E = \frac{\sqrt{2} \cdot U_2}{k_8} \text{ [V]}$$

3. Определяне на амплитудната и ефективната стойност на изходното напрежение:

$$(3.2) U_{om} = \frac{4 \cdot E}{\pi} \text{ [V]}$$

$$(3.3) U_o = \frac{U_{om}}{\sqrt{2}} \text{ [V]}$$

4. Определяне на индуктивността на индуктора - глава II ф-ла (2.18):

$$(3.3) L_k = \mu_o \cdot \frac{\mu_r}{k_6} \cdot \frac{\pi \cdot d_1^2 \cdot w^2}{4 \cdot h_1} = \mu_o \cdot \mu_{rt} \cdot \frac{\pi \cdot d_1^2 \cdot w^2}{4 \cdot h_1}, \text{ [\mu H]}$$

където: k_6 е коефициент, коригиращ стойността на μ_r в случаите, когато сърцевината на бобината не е плътно желязо.

При тръбен индуктор $\mu_{rt} = \frac{\mu_r}{k_7}$ и е винаги ≥ 1 .

Съгласно фиг.3.49 индукторът се разделя на 2 части в зададено съотношение.

$$L_k = L_{k1} + L_{k2}.$$

5. Определяне на работната честота на инвертора - глава II от формула (2.9):

$$f = \frac{503^2 \cdot \rho_2}{\mu_p \cdot \Delta^2}, \text{ [Hz]}$$

а на резонансната честота става по (2.12):

$$f_o = \frac{8,65 \cdot 10^7 \cdot \rho_2}{2 \left(\frac{d_2}{2} - b_2 \right) \cdot h_2 \cdot k_N}, [Hz]$$

6. Определяне на мощността P_p (полезната), отдадена за нагряване от токовете на Фуко в тръбата:

$$P_p = \frac{\xi \cdot G \cdot \Delta T}{t_n} [W]$$

7. Определяне на еквивалентното (активно) съпротивление на индуктора, определящо нагряващото действие на токовете на Фуко:

$$(3.4) \quad R_e = \frac{k_4 \cdot U_o^2}{P_p} [\Omega]$$

където: $R_e = R_{e1} + R_{e2}$ е еквивалентното съпротивление.

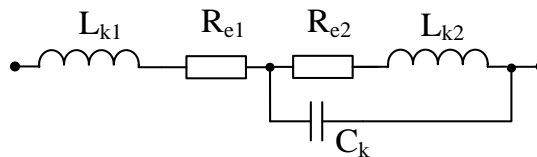
k_4 - коефициент на връзка, характеризира взаимодействието между бобината и металната тръба.

8. Определяне на топлинния КПД - η_T .

$$\eta_T = \frac{P_p}{P}$$

9. Определяне на кондензатора C_k :

Еквивалентната заместваща схема на елементите, включени в диагонала на инвертора е:



фиг.3.50. Схема на товар на резонансен инвертор

Кондензаторът C_k осигурява условия за резонанс с индуктивността L_{k2} в паралелния трептящ кръг, а заедно с индуктивността L_{k1} - в последователния трептящ кръг. Неговият избор зависи от стойностите на тези индуктивности и тяхното съотношение.

Отношението на двете честоти определят коефициент: $a = \frac{\omega}{\omega_0} = 0,85 \div 0,99$

Тогава за C_k се получава: (3.9) $C_k = \frac{a^2 \cdot L_{k2}}{\omega^2 \cdot L_{k2}^2 + a^2 \cdot R_{e2}^2}$

Тъй като, кондензаторът участва в двата колебателни кръга, неговата стойност се избира с **въведения коефициент k_7** :

$$(3.10) \quad k_7 = \left(1 + 0,5 \cdot \frac{L_{k1}}{L_{k2}} \right)$$

Коригирана е формулата от (3.9), като придобива вида за конкретното

приложение: (3.11) $C_k = \frac{k_7 \cdot a^2 \cdot L_{k2}}{(\omega \cdot L_{k2})^2 + (a \cdot R_{e2})^2}, [\mu F]$

k_7 - корекционен коефициент, отчитащ сложния характер на трептящия кръг.

Реално приеманите стойности за корекционен коефициент са $k_7 = 1,18 \div 2$.

10. Определяне на входната мощност P_i :

$$(3.12) \quad P_i = \frac{P_o}{\eta} [W]$$

11. Максималният входен ток I_{Lm} на инвертора се определя от:

$$(3.13) \quad I_{Lm} = \frac{\sqrt{2} P_o}{\eta \cdot E} [A]$$

12. Максимална (I_{cm}) и средна (I_c) стойност на тока през всеки от транзисторите:

$$(3.14) \quad I_{cm} = \frac{U_{om}}{R} [A]$$

където: активното съпротивление в диагонала на моста е: $R = \frac{U_o^2}{P_o} [\Omega]$

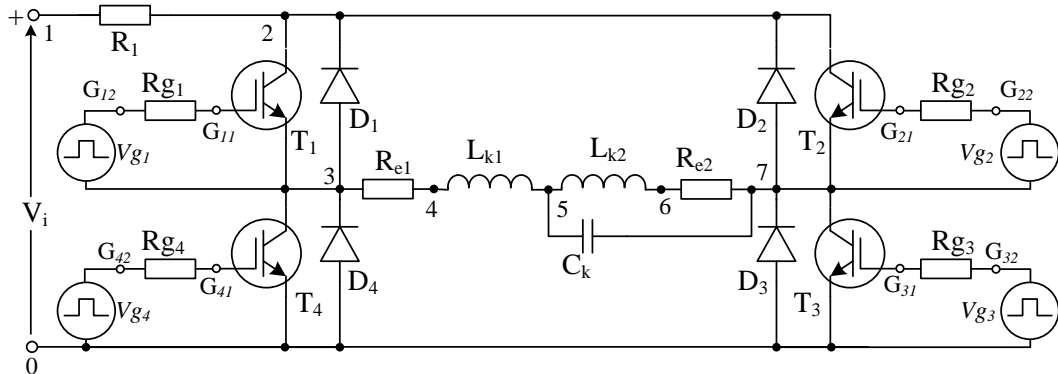
$$(3.15) \quad I_c = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^\pi I_{cm} \cdot \sin\theta \cdot d\theta [A]$$

$$(3.16) \quad I_c = \frac{1}{\pi} \cdot I_{cm} [A]$$

Изведената в предната точка методика за проектиране е верифицирана с пример.

3.3. Симуляционно изследване на инвертор за индукционно нагряване на вода

След направения избор на конфигурация на LLC резонансен инвертор е анализиран PSpice модел на схемата - фиг.3.52. Изследвани са времедиаграми за функционалността на схемата, енергийните и параметри, показващи нейната работоспособност, при различни режими на работа и промяна на някои от параметрите.



фиг.3.52. PSpice модел на изследвания инвертор

-A1- Изследване на стационарен режим на работа при номинален товар

Формата на напрежението и тока през индуктора се изменят по синусоидален закон, като при едната бобина на индуктора има известно изместване на синусоидалата на тока, а при другата на напрежението. Токът през транзисторите е с правилна синусоидална форма. Напрежението върху всеки от транзисторите е със стойност 300V с прави отвесни фронтове на включване и изключване (правоъгълно). Превключването на тока и на напрежението върху транзистора става при нулеви стойности.

-A2 - Изследване на енергетични характеристики

Времедиаграмите на средната стойност на мощностите на индуктивността L_{k1} , индуктивността L_{k2} и средната сумарна мощност на изследвания LLC инвертор са показани на фиг.3.55. Получава се необходимата мощност, отдавана в товара, като има възможност тя да се регулира в желаните граници.

-A3 - Изследване на комутационни загуби

Моментните и средните загуби в транзисторите за избрания LLC резонансен инвертор са еднакви в рамената на изследвания LLC инвертор и стойността им е минимална в границите за добрата му работа.

-A4 - Изследване на коефициент на полезно действие

Коефициентът на полезно действие при симулирания LLC резонансен инвертор е 0,95, което е подобрение на такъв инвертор за индукционно нагряване на вода (сравнено с другите автори).

Б - Изследване на преходен режим на работа при номинален товар

В началния момент на работа режимът на LLC резонансен инвертор не е установен. Процесите са нестабилни и е необходимо да им се направят изследвания, с цел безотказното им функциониране.

-B1-Времедиаграмите на напрежението върху транзистора T_4 -V(3), тока през него I_c (Z_4) и тока през индуктивността $I(L_{k1})$ на изследвания LLC инвертор са показани на фиг.3.58. Времедиаграмите на тока през индуктивността $I(L_{k2})$, напреженията върху индуктивността L_{k1} и индуктивността L_{k2} на изследвания LLC инвертор са показани на фиг.3.59. Инверторът работи нормално, без големи пикови натоварвания на елементите. Наблюдава се, че инверторът работи нормално, без големи пикови натоварвания на елементите. Стойностите на тока и напрежението върху товара в преходния процес са плавно нарастващи, а от там и токът през транзисторите. Това облекчава работата на резонансния инвертор.

- B2 - Енергетични характеристики

Времедиаграмите на средната стойност на мощностите на индуктивността L_{k1} индуктивността L_{k2} и средната сумарна мощност на изследвания LLC инвертор. Стойностите на мощностите в товара в преходния процес са също плавно нарастващи. Това е облекчен режим за целия инвертор.

- B3 - Комутационни загуби и коефициент на полезно действие

Времедиаграмите на моментните и средните загуби на един от транзисторите и коефициента на полезно действие на изследвания LLC инвертор са показани на фиг.3.61. Наблюдава се, че моментните и средните загуби на изследваната схема на LLC инвертор са в рамките на допустимите стойности за такъв вид при индукционното нагряване.

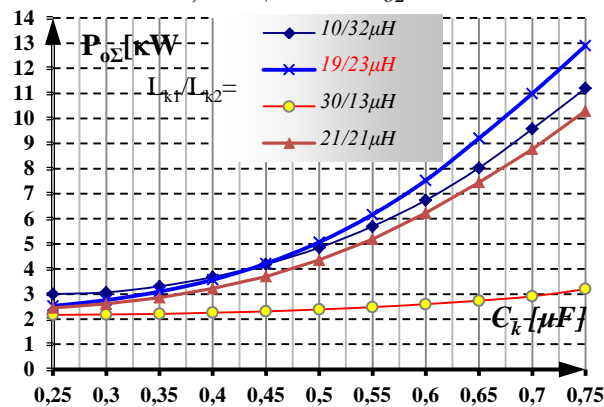
➤ 3.3.3. Получаване на зависимости за чувствителността на инвертора, при изменение на определени параметри

При следващите изследвания са снети зависимости за чувствителността на енергетичните параметри на LLC резонансния инвертор от промяна на стойността на елементи от схемата.

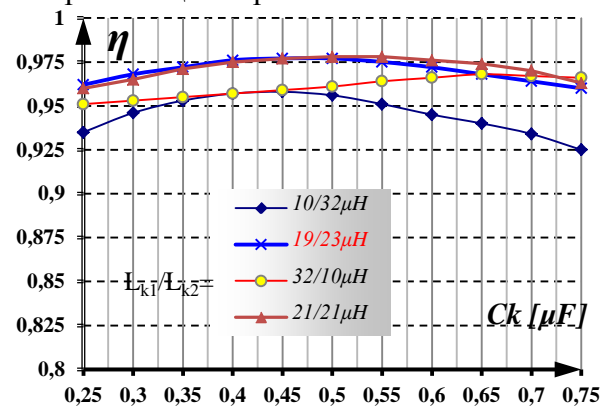
▪ Влиянието на съотношението L_{k1}/L_{k2} върху качествата на работа на инвертора, при промяна на стойността на комутирация кондензатор C_k е показано на времедиаграмите на следващите фигури.

Мощността P_{o1} , отделена в товара от първата бобина-индуктор L_{k1} има хиперболичен, нарастващ характер, при промяна на стойността на комутирация кондензатор C_k . Наблюдава се изразен минимум, при стойност на $C_k = 0,35\mu F$ и силно зависи от съотношението L_{k1}/L_{k2} между големината на индуктивностите. За съотношението $L_{k1}/L_{k2} = 32/10\mu H$, графиката има почти линеен характер, което показва, че товарът на инвертора е далеч от резонанса и кондензаторът не оказва влияние.

При мощността P_{o2} във втората бобина L_{k2} се наблюдава по-плавно, почти линейно нарастване за съотношение L_{k1}/L_{k2} на индуктивностите, различно от $32/10\mu H$. Затова съотношение, мощността P_{o2} има линеен характер по същата причина.



фиг.3.64. Диаграма на средната сумарната изходна мощност на LLC инвертор при промяна на C_k за различни отношения L_{k1}/L_{k2}

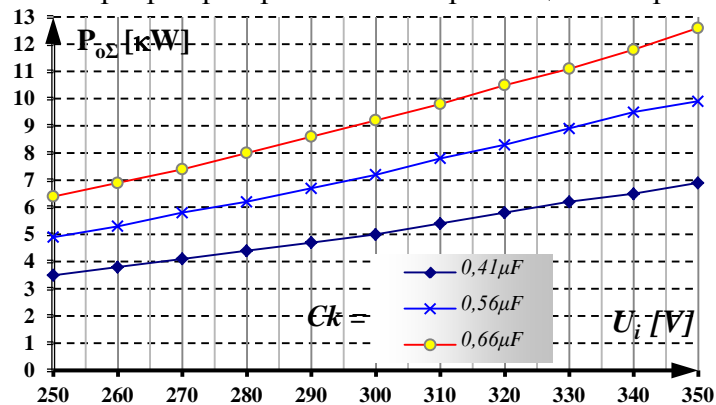


фиг.3.66. Диаграма на кпд

При сумарната мощност $P_{o\Sigma}$ в товара от двете бобини L_{k1} и L_{k2} , изграждащи целия индуктор се наблюдава плавно нарастване в целия диапазон за съотношение L_{k1}/L_{k2} на индуктивностите различно от $32/10\mu H$. При него има линеен характер, поради работа далеч от резонанс. При загубната мощност P_z се наблюдава плавно линейно спадане до $C_k = 0,5\mu F$ за съотношение L_{k1}/L_{k2} на индуктивностите, различно от $32/10\mu H$. След тази стойност на C_k следва по-стръмно нарастване. Това осигурява плавно регулиране при работа на инвертора за променящи се стойности на комутирация кондензатор C_k , което е желано условие. Коефициентът на полезно действие η нараства до оптимална стойност, при големина на комутирация кондензатор $C_k = 0,45\mu F$ за трите съотношения на индуктивностите L_{k1}/L_{k2} .

След тази стойност спада почти до началната стойност. За целия диапазон на изменение η е в необходимите граници над 0,925 и осигурява добра работа.

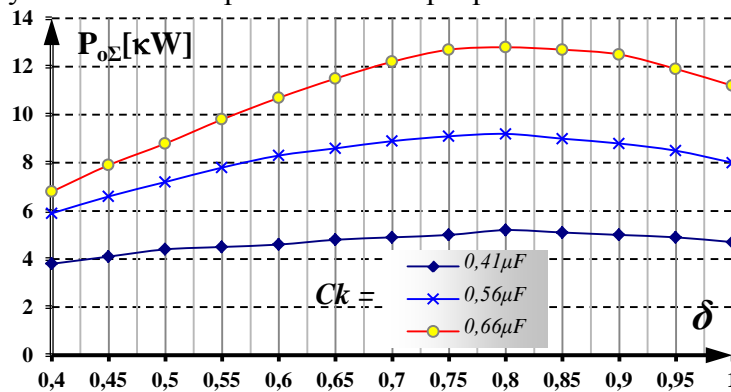
Изследвано е влиянието на стойността на комутирания кондензатор C_k върху качествата на работа на инвертора при промяна на захранващото напрежение.



фиг.3.67. Диаграма на средната стойност на сумарната изходна мощност на LLC инвертор, при промяна на захранващото напрежение U_i за различни C_k

Сумарната изходна мощност, отдавана в товара се изменя линейно нарастващо за целия диапазон на промяна на захранващото напрежение, което осигурява възможност за плавно регулиране и компенсиране на промените му. При изменение на стойността на комутирания кондензатор C_k , изходната мощност се променя аналогично. Това дава възможност за степенно регулиране, в зависимост от необходимостта за стъпално изменение.

■ Изследвано е влиянието на стойността на комутирания кондензатор C_k , при промяна на параметъра δ върху качествата на работа на инвертора.



фиг.3.68. Диаграма на средната стойност на сумарната изходна мощност на LLC инвертор, при промяна на δ за различни C_k

Сумарната изходна мощност $P_{o\Sigma}$ приема максимум, при стойности на изменение на параметъра $\delta=0,7 \div 0,95$. Това се определя от комплексния резонансен характер на товара. Изменението е плавно и дава възможност за точно регулиране на необходимата мощност.

Получените резултати при паралелно изследване на моделите на схемите на последователния резонансен LC инвертор и предложения LLC резонансен инвертор показват: *Постигната е добра функционалност на схемите, при еднаква входна мощност. Получена 4% по-голяма изходна мощност при LLC инвертора. Сумарната мощност в индуктора на двете схеми удовлетворява изискванията за постигане на достатъчно нагряване при максимален дебит на водата. По-ниски загуби в силовите ключовете и по-ниски динамични натоварвания има при LLC инвертора. Коефициентът на полезно действие на LLC инвертор, надвишава този на LC инвертора, средно с (4÷5)%. Комплексната оценка на енергийните и електротехнически показатели на изследваните*

схеми, показва определени предимства на LLC инвертора. Получени са много добри енергетически показатели за проектирания LLC резонансен мостов инвертор за индукционно нагряване на вода.

Приносите към III глава са:

1. Направен е сравнителен анализ на работата на автономен резонансен инвертор с отворен и затворен вход с товар - индуктор за нагряване на флуиди. Установени са особеностите на приложение на разновидностите на резонансен инвертор с отворен и затворен вход за индукционно нагряване на вода.
2. Анализирани са общите параметри на работата на мостов резонансен инвертор при различни схеми на включване на индуктора и са доказани предимствата на схема на LLC резонансен мостов инвертор за индукционно нагряване на вода.
3. Предложена е методика за проектиране на LLC резонансен мостов инвертор за индукционно нагряване на вода. Изведени са изчислителните зависимости за избрания тип LLC резонансен инвертор. Въведен е коефициентът - k_7 за избор на комутиращ кондензатор в LLC резонансен инвертор.
4. Приложен е коефициент за магнитна индукция на индуктора - k_6 , в зависимост от габаритните размери на избрания индуктор и режима на работа на инвертора.
5. Сравнени са параметрите на работа на LLC инвертор и LC инвертор за нагряване на вода. Доказани са: по-ниски загуби в силовите ключовете и по-ниски динамични натоварвания при LLC инвертора; коефициентът на полезно действие на LLC инвертор надвишава този на последователния LC инвертор средно с (4÷5)%; комплексната оценка на енергийните и електротехнически показатели на изследваните схеми показва определени предимства на LLC инвертора.

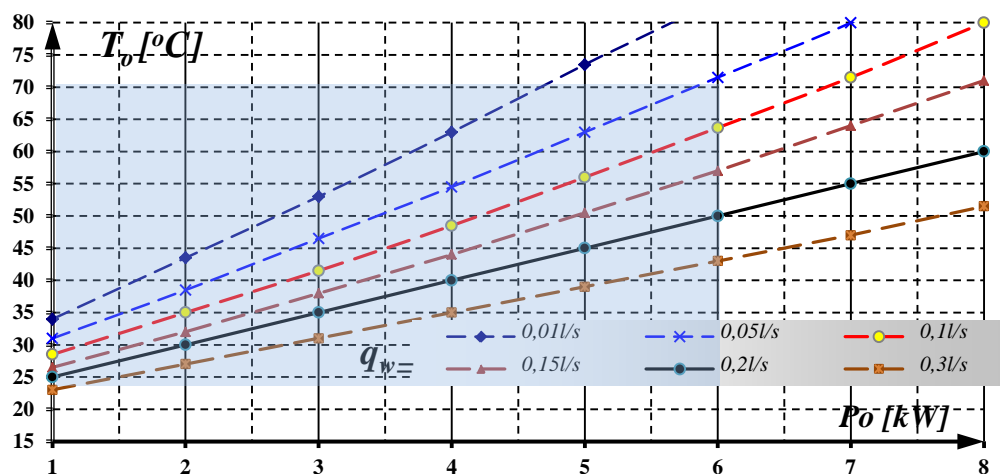
IV. ГЛАВА. РЕГУЛИРАНЕ ТЕМПЕРАТУРАТА НА ВОДАТА ПРИ ИНДУКЦИОННО НАГРЯВАНЕ

Анализиран е всеки един от методите на регулиране на избраната схема на LLC резонансен инвертор. Извършено е сравнение между тях. Показани са резултати от експерименталните изследвания и е направена верификация със симулационните резултати.

Регулирането на температурата на нагрявания флуид се реализира с промяна на мощността, подавана от резонансния инвертор към индуктора.

При нагряване на вода се изисква регулиране на изходната температура. По формула (1.9) се получава необходимата изходна мощност на инвертора при определен дебит на водата.

$$(2.1) \quad P_o = q_w \cdot c \cdot \Delta T = q_w \cdot c \cdot (T_o - T_i) \quad [kW]$$

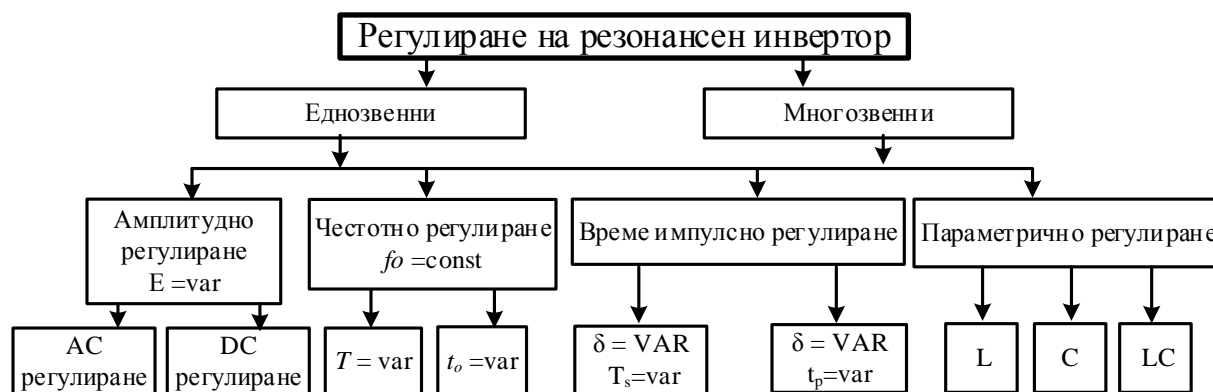


фиг.4.1. Диаграма на изходната температура T_o , при промяна на изходната мощност за различни стойности q_w

От фиг.4.1 се вижда, че като се осигури регулиране на изходната мощност на инвертора в границите от 2 до 6 kW, ще се регулира температурата в широки граници от 25°C до 60°C, достатъчни при използване на прибора за битов бойлер. Тъй като при разглежданата СИН се приема, че AC/DC преобразувателят е неуправляем следва, че изходната мощност на системата може да се регулира, само ако се управлява АИ.

Методите за регулиране на изходната мощност на резонансния инвертор, използвани от авторите в апаратурите за индукционно нагряване са: честотно, амплитудно, времеимпулсно и параметрично регулиране.

На фиг 4.22 е дадена класификационна схема на видовете регулиране на резонансните инвертори и параметрите, по които става това регулиране.



фиг.4.22. Класификация на методите за регулиране на резонансен инвертор за индукционно нагряване

Направен е анализ и изследване на методи за регулиране температурата на водата при индукционно нагряване

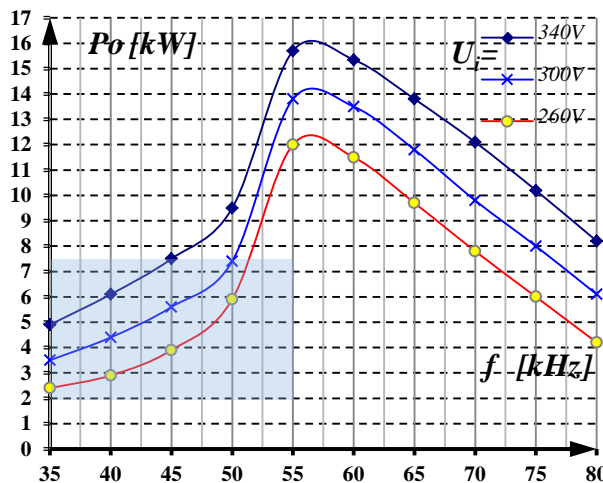
➤ Честотен метод на регулиране - промяна на f

Променя се работната честота на управляващите импулси на силовите транзистори, спрямо резонансната честота на сложния последователно-паралелен трептящ кръг, като товар на мостов резонансен инвертор. Резисторите R_{e1} и R_{e2} са еквивалентни активни съпротивления и отразяват загубната мощност от токовете на Фуко, които нагряват тръбата и затоплят водата. Формите на тока и напрежението на транзисторите се запазва синусоидална, при широки граници на регулиране. Коефициентът на полезно действие се променя от 0,88 до 0,92 и удовлетворява изискванията за индукционно нагряване на вода.

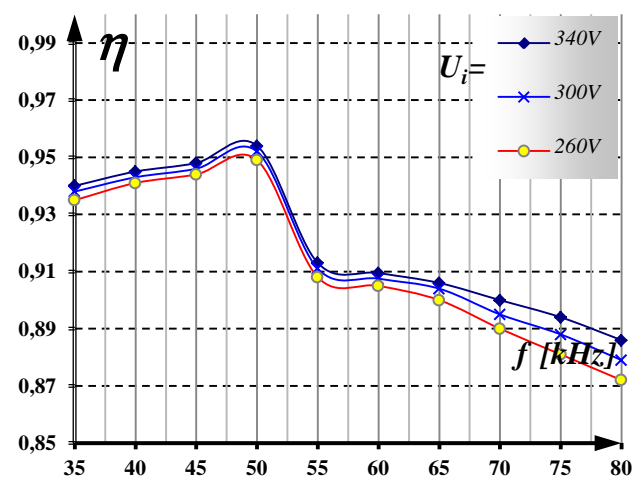
От времедиagramите се заключава, че напрежението върху транзистора е с правоъгълна форма и не надвишава захранващото напрежение от 300V. Това дава възможност за получаване на максимален коефициент на използване на транзисторите по напрежение ($k_u = I$). Формата на тока I_c в транзисторите ($T_1 \div T_4$) е близка до синусоидалната. Формата на тока през първия индуктор I_{Lk1} е близка до синусоидална, а през втория индуктор I_{Lk2} е синусоидална. Постиганата изходна мощност за целия индуктор удовлетворява заданието за достигане на необходимата температура. В първия индуктор мощността е два пъти по-малка, от тази във втория индуктор. Загубната мощност в транзисторите е малка.

При номинален режим формата на токовете и напреженията в двата индуктора е близка до синусоидална, при достигане на достатъчна изходна мощност и минимални загуби в транзисторите. Тези показатели не се запазват при дълбокото регулиране на изходната мощност. Наблюдава се нарушаване на синусоидалната форма на тока през транзисторите и ненулево изключване на тока им. Токът през индуктора I_{Lk2} на паралелния кръг запазва синусоидална форма. Но токът I_{Lk1} през другата част на индуктора L_{k1} , образуващ последователния трептящ кръг е с прекъснат характер и форма, еднаква с тази на тока през

транзистора. Въпреки недобрят режим на работа на инвертора се постига необходимото регулиране на мощността и се запазват малки загуби в транзисторите.



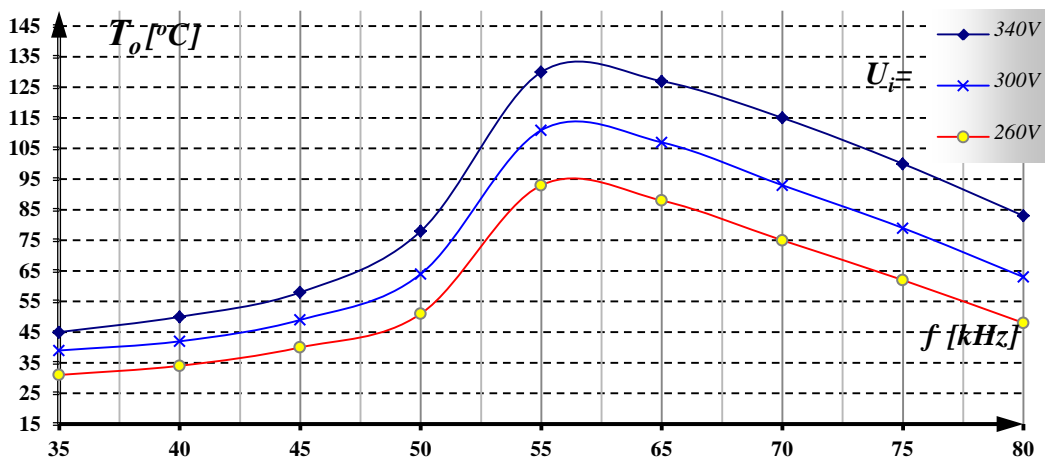
фиг.4.40а. Диаграма на изходната мощност P_o при промяна на работната честота за три стойности на захранващото напрежение U_i



фиг.4.43а. Диаграма на кпд η

Мощността, отделена в товара има плавно изменящ характер, при промяна на работната честота f до около $50kHz$. В честотния диапазон от $(50\div 80)kHz$, мощността има изявен максимум при $57kHz$, като нарастването е с по-голяма стръмност, след което към високите честоти се получава почти линейно намаляне. При промяна на захранващото напрежение в рамките на $\pm 10\%$ графиките са успоредни. Благоприятният работен диапазон от $(33\div 50)kHz$ дава възможност за плавно регулиране при промяна на работната честота f и така се компенсират промените на захранващото напрежение за постигане на желаната мощност, респективно желаната температура на нагряване на водата. При средната загубна мощност се наблюдава нарастване на загубите върху транзистора с нарастване на честотата до $60kHz$, след което е почти постоянна. В работния честотен обхват до $50kHz$ нарастването е минимално. При трите стойности на захранващото напрежение диаграмите са почти успоредни и са приемливи за вида инвертор и постигане на необходимата мощност и в сравнение с последователния резонансен инвертор имат малко по-малка стойност. При диаграмата на максималния ток I_{ce} през всеки от транзисторите $T_1\div T_4$ се наблюдава екстремум при $57kHz$. След $35kHz$ има характер на плавно линейно нарастване. Транзисторите работят при допустимия за тях максимален ток в импулсен режим. В областта на $35kHz$, токът в транзисторите е по-малък от аналогичната зависимост при последователния инвертор (фиг.4.31) Това се получава защото, се работи със сложен трептящ кръг (последователно-паралелен) за товар на инвертора. В паралелния контур, след като спре да тече ток през транзисторите, остава запасена енергия през част на полупериода. Напрежението върху реактивните елементи е по-голямо и затова независимо от намалението на тока, мощността продължава да има нарастващ характер. Коефициентът на полезно действие е с почти линеен характер в областта над $\eta=0,94$ в честотния обхват $(35\div 50)kHz$ при изменение на работната честота. И при трите стойности на захранващото напрежение графиките почти се припокриват. Това свидетелства за добра и стабилна работа на LLC резонансния инвертор през процеса на регулиране, въпреки сложния характер на трептящия кръг-товар и η е по-голям от аналогичната зависимост при последователния инвертор (фиг.4.32).

Зависимостта на изходящата температура на водата от мощността на инвертора е дадена в [1] и при изменение на температурата от $30^\circ C$ до $80^\circ C$, променя мощността от 1 до $10kW$.



фиг.4.44а. Диаграма на изходната температура T_o при промяна на работната честота за три стойности на захранващото напрежение U_i

Изменението на температурата има нелинеен характер, с плавно изменение при честоти под $50kHz$ и стръмно нарастване до изявения максимум при $57kHz$, след него към високите честоти се получава почти линейно намаляне. При промяна на захранващото напрежение са успоредни. В реалния работен диапазон от $(35\div 50)kHz$ изменението е линейно.

Всички досегашни изследвания са реализирани при една стойност на дебита q_w на течащата вода ($q_w = 0.2l/s$). Изводите които се правят са: *Резонансен инвертор с последователно-паралелния товар е работоспособен в широк диапазон на изменение на изходната температура T_o ($15^\circ C \div 80^\circ C$), а за работния участък ($40^\circ C \div 60^\circ C$), изменението на мощността P_o придобива линеен характер. Има по-малки загуби върху транзисторите в целия диапазон на изменение на мощността и по-висок коефициент на полезно действие в сравнение с последователния резонансен инвертор.*

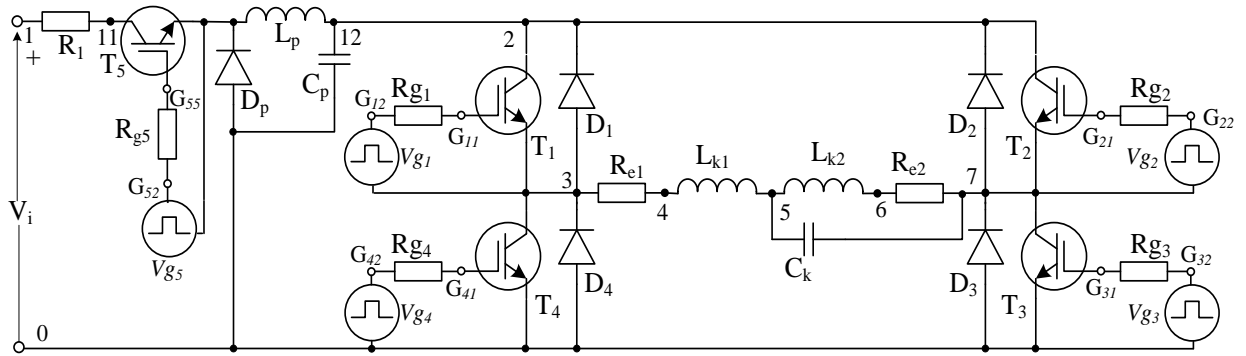
Недостатък на предложената схема е, че формата на тока през транзисторите в режим на дълбоко регулиране не е синусоидална и води до нелинейна характеристика на изменение на тези токове в диапазона на регулиране, дължащо се на сложната конфигурация на *LLC* кръг.

➤ **Амплитуден метод** на регулиране чрез промяна на захранващото напрежение E

При амплитудното регулиране на изхода на инвертора има напрежение и ток с определена постоянна или регулируема честота и ширина на импулсите. Амплитудата на захранващото напрежение се изменя в зависимост от температурата, необходима за подгриване на водата (мощност на инвертора) във времето. Функцията на изменение е $U_o=f(E)$ и има линеен характер. В случая, който се разглежда се прилагат понижаващи високочестотни преобразуватели на напрежение от типа „Buck” DC/DC конвертор.

Преимущества на амплитудното регулиране на мощността на инвертора с резонансен товар са: в целия диапазон на регулиране на мощността се използва режим на мека комутация *ZCS* и *ZVS*; работа на инвертора, при която параметрите не се променят; амплитудното регулиране се реализира в голяма част от диапазона на мощността ($10\div 100\%$). Недостатък на амплитудното регулиране е необходимостта от използване на допълнителен регулируем източник на напрежение, който е съпоставим по мощност с този на самия инвертор.

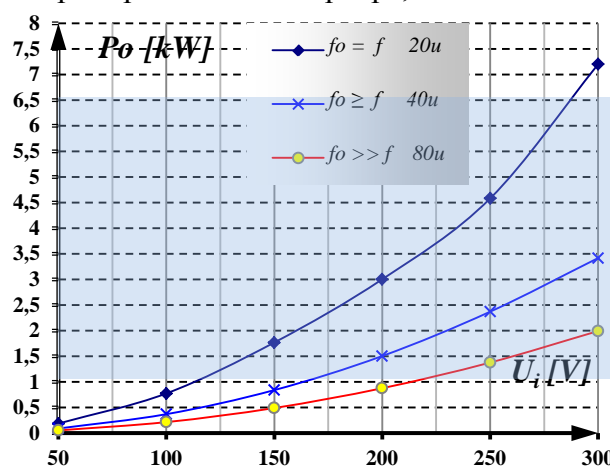
Задълбочени изводи за работата се правят при амплитудно регулиране на изходната мощност на избраната схема на *LLC* резонансен инвертор.



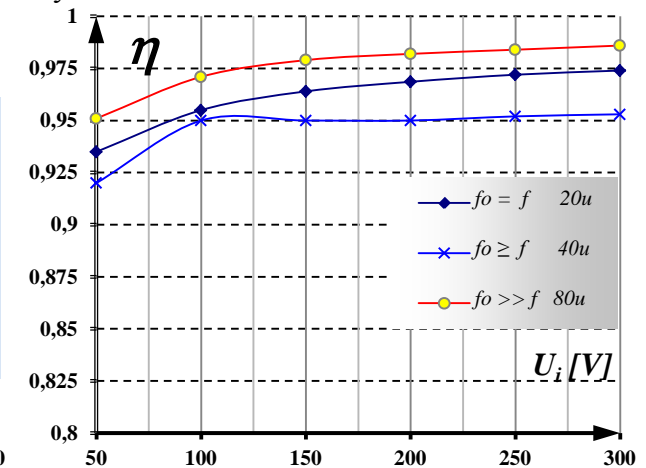
фиг.4.47. Pspice модел на изследвания LLC инвертор при амплитудно регулиране

На входа се подава постоянно напрежение, което има възможност да бъде регулирано и се реализира с понижаващ преобразувател, изграден с един транзистор T_5 .

За работоспособността на изследвания LLC инвертор при амплитудния метод на регулиране се съди по вида на времедиagramите. Напрежението върху транзисторите е с правоъгълна форма, пропорционална на подаденото захранващо напрежение. Токът при включване и изключване на транзистора $I_c(T_4)$ става при нулева стойност, отговаря на режим на мека комутация и неговата максимална стойност е равна на $48A$. Токът през L_{k1} има форма близка до синусоидалната и повтаряща тази на $I_c(T_4)$, леко изместена от преобладаващия индуктивен характер на последователния трептящ кръг. Токът през L_{k2} има синусоидална форма. Изходната мощност достига необходимата при нагряването стойност до $7kW$. Средната стойност на загубната мощност в транзисторите P_{zc} е ниска - $38W$. При моментната и стойност се наблюдават тънки пикове и стойност при импулс, нараснала до $160W$, заради голямата изходна мощност. КПД е около $\eta=0,98$, което показва добрата работа на инвертора, независимо от загубите.



фиг.4.49. Диаграма на изходната мощност P_o при промяна на захранващото напрежение U_i за три съотношения на f



фиг.4.52. Диаграма на кпд η при промяна на захранващото напрежение U_i за три съотношения на f

Зависимостта на мощността, отделена в товара има плавно изменящ се експоненциален характер, при регулиране на захранващото напрежение на входа на инвертора. Семейството характеристики започват при почти една и съща стойност. Най-големи мощности се получават при $f_o = f$, където регулирането става по-стръмно. Колкото f се отдалечава от f_o , толкова регулирането става по-слабо и изходната мощност е с по-малка стойност.

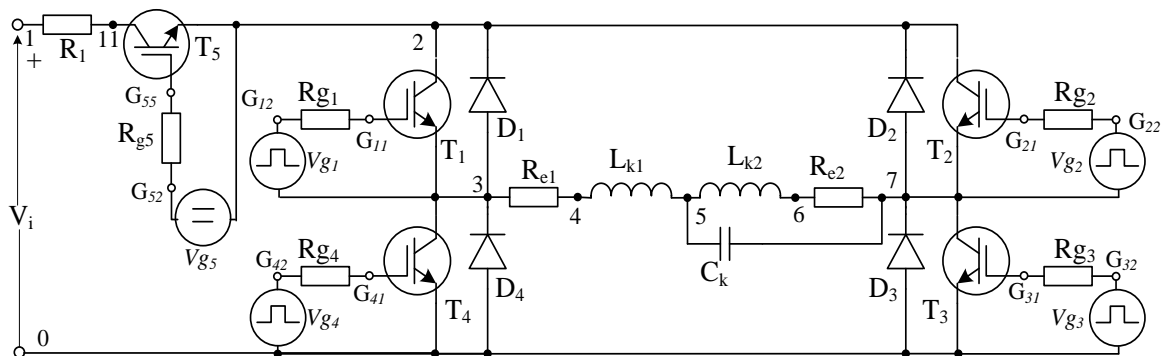
Зависимостта на загубната мощност на изследвания LLC резонансен инвертор е почти линейна. При честоти близки до $f_o = f$ и изпълняващи условието $f_o > f$ графиките са с почти еднакви стойности и се припокриват. За различните режими на работа, при честоти силно различаващи се $f_o \gg f$ загубите са малки, поради ниската изходна мощност. Като цяло те са

в допустимия диапазон на работа на транзисторите. Получените зависимости за η на изследвания LLC резонансен инвертор в началния интервал до $150V$ има нарастващ характер, след тази стойност е линеен. И при трите режими на работа са с близки стойности и са паралелни. При режим на $f_o \gg f$ има най-голям коефициент на полезно действие η , поради най-малката мощност и формата на тока, определена от режима.

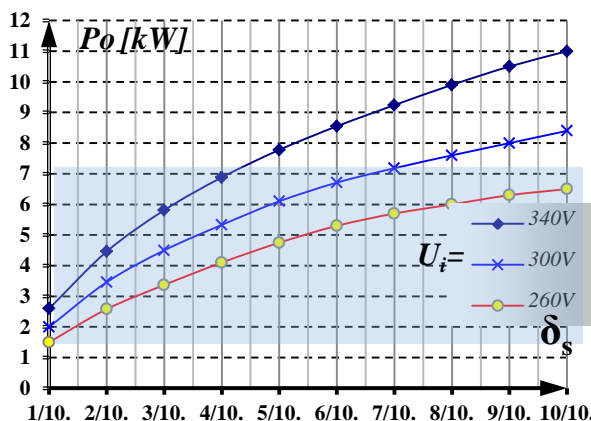
➤ Време-импулсно регулиране

Същността на този метод е: инверторът работи на честота, равна на резонансната честота на товара $f = f_o$. Последователно подаваните импулси оформят пакети с продължителност - t_s , които се редуват от паузи с продължителност - t_p . Регулирането на мощността става чрез управление на продължителността на пакетите импулси t_s . Когато това съотношение е поравно, то средната мощност на товара е 50% от максималната. Коефициентът на запълване е: $\delta_s = \frac{t_s}{T_s}$. В целия диапазон на регулиране на мощността ($10 \div 100\%$) може да се обезпечи режим на ZCS комутация.

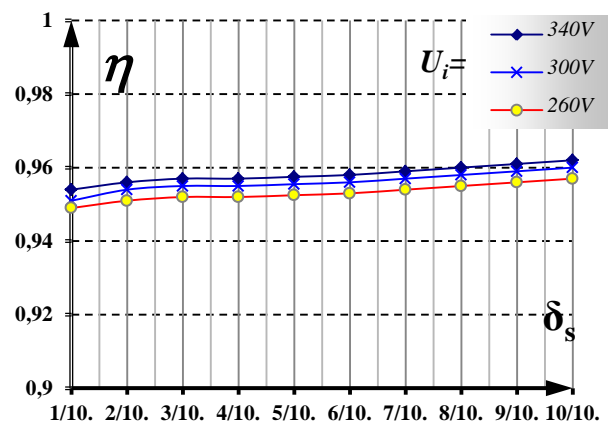
Задълбоченото изследване на работата на избраната схема за изследвания LLC резонансен инвертор с последователно-паралелен трептящ кръг за товар при време-импулсно регулиране (ВИР) се реализира, чрез мощен ключов транзистор на входа на захранването на инвертора с управляващ блок. С промяна на управлението се пуска и спира целия инвертор за определени периоди от време. Така върху товара се получават пакети от импулси с константна честота и паузи в определено отношение, отговарящо на необходимата мощност за нагряване на водата.



фиг.4.55. Pspice модел на изследвания LLC инвертор при ВИР



фиг.4.57. Диаграма на изходната мощност P_o при промяна на отношението δ_s за три стойности на захранващото напрежение U_i



фиг.4.59. Диаграма на кпд η при промяна на отношението δ_s за три стойности на захранващото напрежение U_i

Мощността, отдадена в товара има плавно изменящ характер при промяна на отношението δ_s . При по-малките отношения мощността нараства с по-голяма стръмност. При промяна на захранващото напрежение графиките са успоредни, като нарастват към по-големите отношения. Това дава възможност за плавно регулиране, при промяна на

отношението δ_s и така се компенсират промените на захранващото напрежение за постигане на желаната мощност. При средната загубна мощност се наблюдава нарастване на загубите върху транзистора с нарастване на отношението на пакетите от импулси при константна честота в целия честотен обхват. Загубите нарастват до $55W$ за $300V$ и са приемливи за този режим на работа. Коефициентът на полезно действие има линеен характер, при изменение на отношението с константна честота и е в областта над $0,95$ и графиките почти се припокриват. Това свидетелства за добра и стабилна работа на LLC резонансният инвертор през целия процес на регулиране, въпреки сложния характер на трептящия кръг-товар.

❖ Резултати от експерименталните изследвания

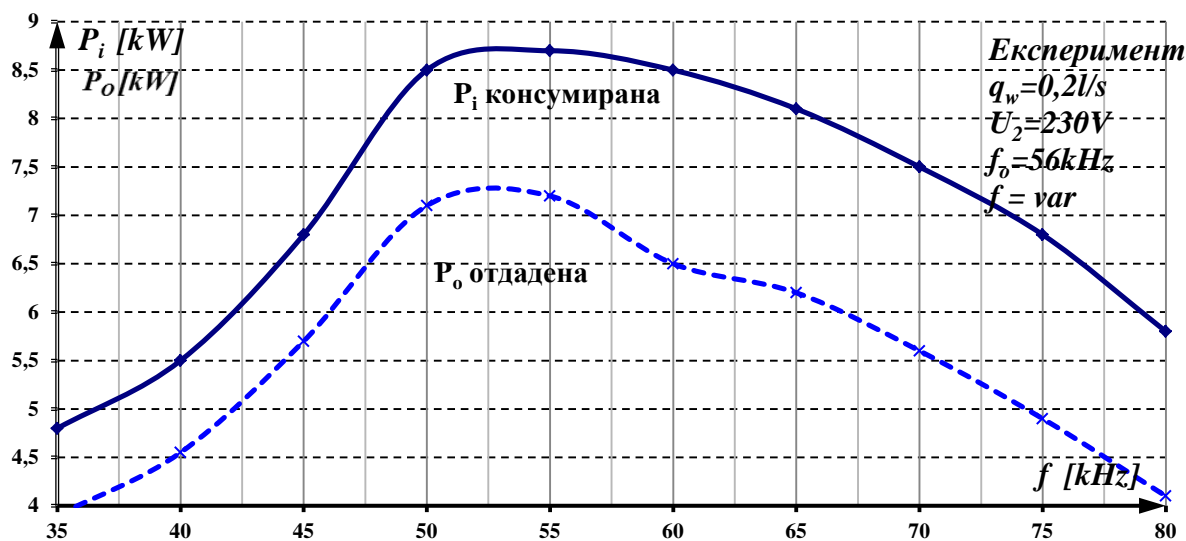
Целта, която е поставена е изследване на работещ макет за индукционно нагряване на вода. Проучване на възможностите за достигане и поддържане на зададената температура в реални работни условия. Да се направи верификация на получените резултати от опитната постановка с тези от симулационното PSpice изследване.

Първоначално се пуска водната помпа с дебит на водата до $12l/min$ (максимален дебит на водната помпа) да започне да циркулира в системата. Водата се взема от голям съд с начална температура на водата $T_i = 20^\circ C$ и се изтича в друг такъв. И в двата има по един цифров термометър за следене на температурата на входящата и изходящата вода. Включва се управляващият блок на инвертора с по-висока от резонансната честота, която в следствие се донасройва до резонансната. Захранващо напрежение от мрежата U_2 се подава чрез автотрансформатор (регулируемо от $(0 \div 230)V$ ас към изправителя на мостовия резонансен инвертор. Със съответните уреди се следят напреженията, токовете, изходната мощност и температурите.

Направени са експериментални характеристики при работа на макета на входната и изходната мощности при честотно и амплитудно регулиране. Проучено е изменението на изходната мощност при промяна на комутацията кондензатор. Реализирана е зависимостта на изходната температура при честотно регулиране.

➤ Експериментални характеристики

А. На таблица 4.3 са показани резултатите, получени от опитната постановка, а на фигура 4.72 е изобразена зависимостта на консумираната от източника мощност P_i и изходната мощност P_o от промяната на работната честота f .

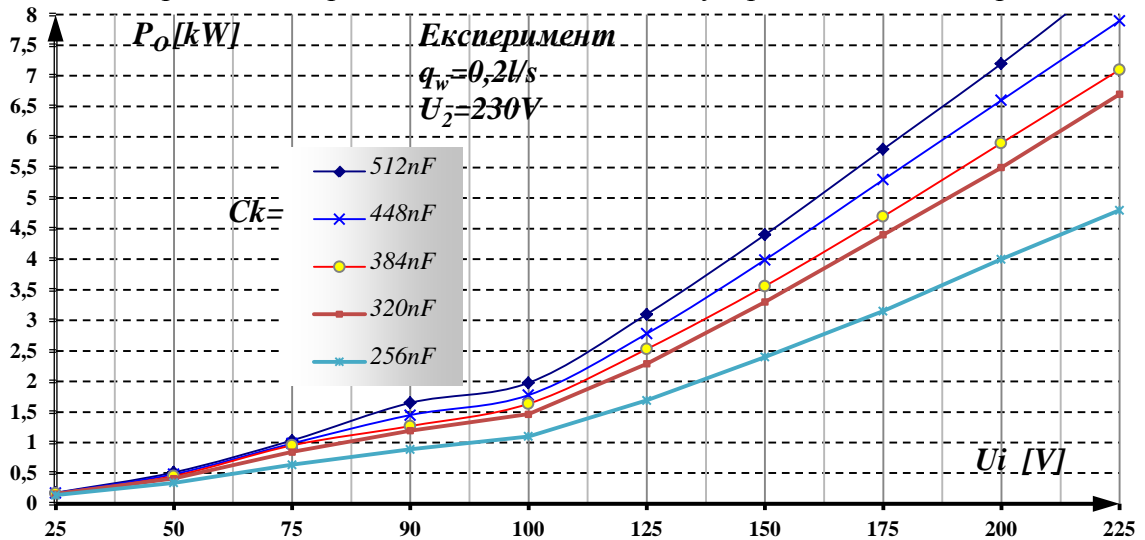


фиг.4.72. Зависимост на консумираната мощност P_i и P_o от промяната на работната честота f

От диаграмите се вижда, че характерът на изменение на консумираната мощност P_i и изходната мощност P_o са почти еднакви и с еднакво изменение, при промяна на работната

честота до около 50 kHz. След тази честота намаляването на изходната мощност става по-бързо, което се дължи на нарастване на загубите в транзисторите, поради несинусоидалната форма на тока в тях.

В. На таблица 4.4 са показани резултатите, получени от опитната постановка, а на фигура 4.73 са изобразени зависимостта на изходната мощност P_o от промяната на захранващото напрежение за различни стойности на комутирания кондензатор C_k .

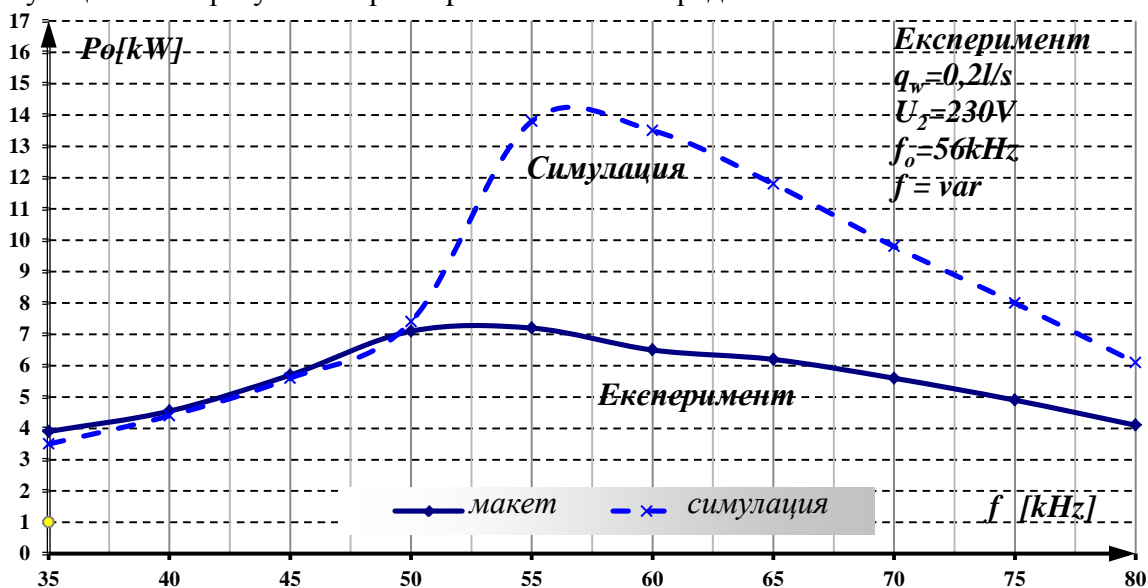


фиг.4.73. Зависимост на изходната мощност P_o при промяна на захранващото напрежение за различни стойности на комутирания кондензатор C_k

Резултатите за изходната мощност, получени от опитната постановка показват, че може да се компенсира промяната на захранващото напрежение чрез промяна на стойността на комутирания кондензатор C_k . Изходната мощност се променя стъпалообразно и се достига необходимата и стойност за исканото загряване на водата.

1.4.1. Верификация на получените практически и симулационни резултати

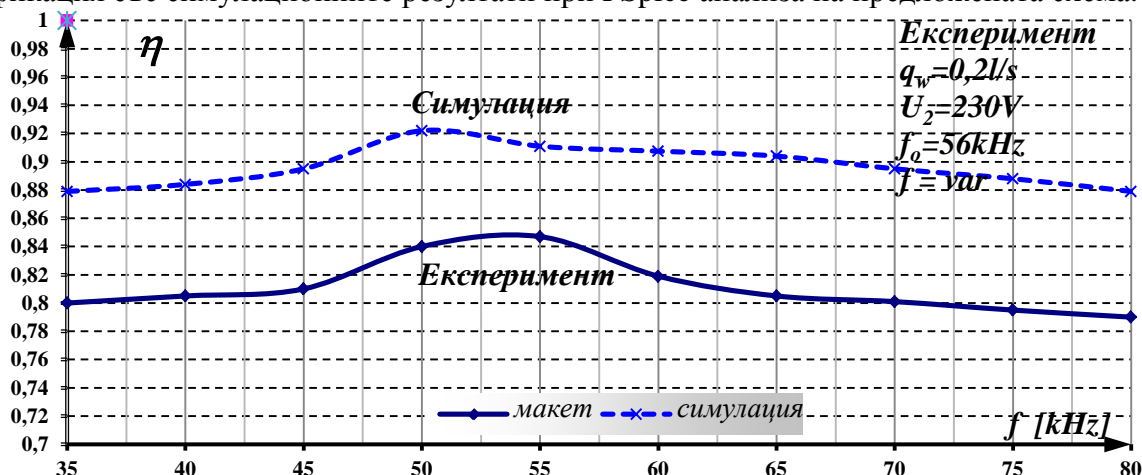
А. На таблица 4.5 са показани резултатите, получени от опитната постановка и симулацията, а на фигура 4.74 е изобразена зависимостта на изходната мощност P_o от промяната на работната честота f на макета, като е направена верификация със симулационните резултати при PSpice анализа на предложената схема.



фиг.4.74. Диаграма на средната стойност на изходната мощност P_o в индуктора при изменение на работната честота f при изследване на макета и при симулация

От диаграмата се вижда, че резултатите получени от опитната постановка са с по-малка изходна мощност. Това се дължи на разликата на съпротивления на товара при реални и симулационни условия. При честота равна на 50kHz двете графики се пресичат и там са най-благоприятните условия на работа на инвертора с минимални изкривявания и загуби.

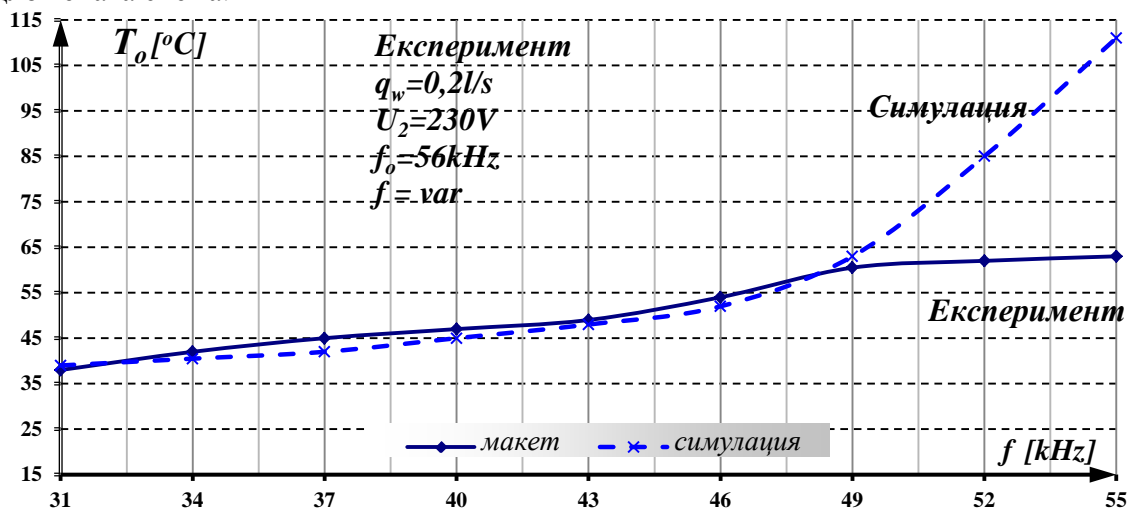
В. На таблица 4.6 са показани резултатите, получени от опитната постановка и симулацията, а на фигура 4.75 са изобразени зависимостта на коефициента на полезно действие η в зависимост от промяната на работната честота f на макета, като е направена верификация със симулационните резултати при PSpice анализа на предложената схема.



фиг.4.75. Диаграма на коефициента на полезно действие η при изменение на работната честота f при изследване на макета и при симулация

От диаграмата се вижда, че резултатите, получени от опитната постановка са с по-нисък коефициент на полезно действие. Това се дължи на разликата на съпротивления на товара при реалните и симулационните условия. Двете зависимости са почти паралелни, което води до извода, че характерът на товара е почти идентичен. Разлика се наблюдава и при резонансна честота, вследствие толеранса на кондензаторите и бобините.

С. На таблица 4.7 са показани резултатите, получени от опитната постановка и симулацията, а на фигура 4.76 са изобразени зависимостите на температурата на водата на изхода на тръбата в зависимост от промяната на работната честота f на макета, като е направена верификация със симулационните резултати при PSpice анализа на предложената схема.



фиг.4.76. Диаграма на изходната температура T_o при изменение на работната честота f

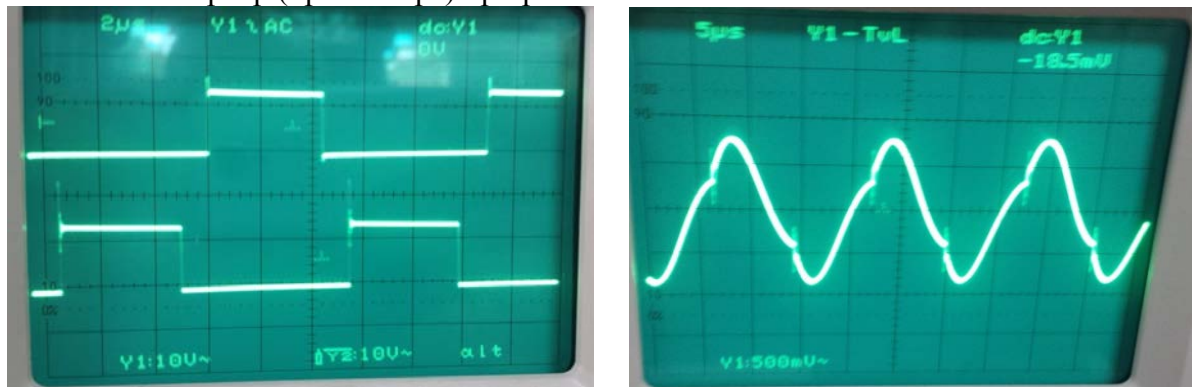
От получената зависимост за температурата T_o на водата на изхода на топлообменника се констатира, че тя се изменя по почти линеен закон. Това дава възможност за плавно и прецизно регулиране на топлинния процес на системата. До 48kHz и двете характеристики са почти идентични, след което симулационната характеристика продължава стръмно нагоре. Това се дължи на нарушаване на режима на работа на инвертора.

Общият вид на експерименталната система е показан на фиг.5.3.



фиг.5.3. Общ вид на експерименталната система

На фиг.4.70 и 5.12 са снети времедиаграмите на самия гейт на транзистора след драйверния трансформатор и времедиаграмата на тока през диагонала на моста на резонансния инвертор (през товара) при работна честота 65kHz.



фиг.5.12. Осцилограма на управляващите импулси и фиг.4.70 тока през товара

Функционалността на схемата се вижда на осцилограмата при режим близък до синусоидална форма. Амплитудата на тока се снима с токов трансформатор. Токовият трансформатор има преводно отношение 20:1. Това означава, че измерен ток 1А на токовия трансформатор, който отговаря на 20А, ток преминал през товара. Чувствителността на осцилоскопа е на $V/div=500mV$. При измерени 1,5V се отчита 10А. При тази времедиаграма $I_o=12A$. Времето е при $t/div=5\mu s$, отговарящо на $15,5 \mu s$ и тогава $f=65kHz$.

Размерът и дизайнът на индуктора зависят от схемното решение, от размера на нагриваната площ и честота на трептящия кръг. Инверторът работи като източник на мощност, а индукторът е необходимо да постигне температура от порядъка на $200^{\circ}C$. Индукторът е навит с 54 витки на диаметър $d_1=70mm$ с дължина $h_1=350mm$ върху тръба с диаметър $d_2=63mm$ и дължина $h_1=410mm$. С диаметъра на навивките и дължината на индуктора може да се променя индуктивността на бобините и оттам да се променя резонансната честота.

Първоначално експериментите са направени с еднакви стойности на двете бобини $L_{k1} = L_{k2}$, изграждащи индукторът за нагряване, показан на фиг.5.16.



фиг.5.16. Общ вид на двете бобини $L_{k1} = L_{k2}$, изграждащи индуктора

В последствие при подобряване на схемата експериментите са направени при различни стойности на двете бобини $L_{k1} \neq L_{k2}$, изграждащи индуктора за нагряване, показан на фиг.5.17.



фиг.5.17. Общ вид на двете бобини $L_{k1} \neq L_{k2}$, изграждащи индуктора

Подробно описание на лабораторния макет е дадено в приложение 1.

Изводи:

1. Направените сравнителни оценки на представените схеми са основа за изследване на подходящи методи за регулиране на температурата при индукционно нагряване.
2. Подробно е изследван честотния метод за регулиране на изходната мощност на резонансния инвертор. За сравнение са анализирани LC последователен резонансен инвертор и LLC резонансен инвертор. Получени са по-добри енергетични характеристики за LLC резонансен инвертор.
3. Подробно е изследван амплитудният метод за регулиране при LLC резонансен инвертор за нагряване на флуиди. Получените зависимости за LLC резонансен инвертор доказват добрите показатели на схемата, като единственият недостатък е по-сложната топология.
4. Подробно е изследван време-импулсния метод за регулиране при LLC резонансен инвертор за нагряване на флуиди. Получените енергетични характеристики при време-импулсния метод за регулиране потвърждават избора на схемата, като допълнително предимство е, че не се налага използването на допълнителни комутиращи транзистори.

Приноси към IV глава:

1. Определена е зависимостта на температурата от мощността на инвертора за битов бойлер при различни дебити на водата.
2. Реализирана е класификация на методите за регулиране на резонансни инвертори за индукционно нагряване.
3. Изведените и доказани експериментално зависимости дават възможност за приложение на разгледаните методи за регулиране на резонансни инвертори за индукционно нагряване в практиката.
4. Проведените реални експерименти и получени резултати са верифицирани с получените чрез симулации, графики и зависимости на система за индукционно нагряване.

ОБЩИ ИЗВОДИ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Индукционното нагриване на вода е безконтактен метод на нагриване, даващ възможност за нагриване на различни по химичен състав течности и газове. Нагриването става с магнитен поток, безинерционно, за по-кратко време от конвенционалните нагреватели. Не е необходимо акумулиране на топлината. Липсва котлен камък, затрудняващ допълнително нагриването. Управлението на процеса може да се реализира стъпалообразно или плавно.

Магнитният поток на индуктора се насочва възможно най-добре към нагривания детайл. Конструкцията на топлообменника определя, количеството топлина, отдадена в металния топлообменник да преминава във водата.

Разгледаните голям брой конструкции, прилагани от други автори, с показани особености, предимства и недостатъци, дават възможност за избора на три вида подходящи топлообменници - стандартна желязна тръба, брой тръбички в керамичен патрон в неметална тръба, патрон от лист желязна ламарина, навита на архимедова спирала, дадена накъсо в неметална тръба. При тръба се избира да е тънкостенна - нагрива се повърхността на стената. Ако се предпочете сърцевина, обтекаема от флуида, тя е отдалечена от индуктора и това налага по-дълбочинно нагриване. Предимства имат индуктори от патронен тип и индуктори с магнитопроводи. При тях се реализира по-пълно използване на елекромагнитната енергия и по-добро топлоотдаване. По-добро регулиране на температурата се получава при секционен свързване (стъпково регулиране).

Направената класификация насочва какъв тип индуктор да се избере в зависимост от конкретното приложение.

От изследване на създадената методика за проектиране на индуктора се констатира, че при промяна на размерите на определени габарити: дължина, дебелина на индуктора при константен брой навивки и други габаритни размери, индуктивността на индуктора се влияе силно. Така се постига необходимата индуктивност, съгласувана с импеданса на товарното съпротивление на използвания резонансен инвертор. Размерите на тръбата и индуктора могат да бъдат избирани според технологичните особености на практически реализируемата система за нагриване на вода.

При внедряване на индуктори за нагриване на флуиди са формулирани препоръките: електромагнитното поле да се използва възможно най-пълноценно, с минимални загуби от разсейване във външното пространство. Получената топлинна енергия да се запази максимално в системата, без да има възможност от разсейване в околното пространство. При избора на конструкция на системата трябва да се търси максимално подходящо електромагнитно обтичане и топлинно предаване. Необходими са мерки за предпазване на околното пространство от електромагнитни смущения и постигане на подходящ качествен фактор на мощността на силовия преобразувател.

Променената според приложението еквивалентна схема на индуктора дава възможност да се изчисли еквивалентното съпротивление на товара - индуктор

и показва, от кои елементи най-много се определя неговата стойност и кои могат да бъдат пренебрегнати.

Практическите конструкции се доближават до изчислените параметри и потвърждават верността на предложената методика. Отклоненията на резултатите от изчисленията на индуктора и опитно потвърдените са по-малки от 10%.

С цел да се реализира по-добър избор на схемен вариант на автономен инвертор са реализирани PSpice симулации на използвани в индукционното нагряване инвертори, като са анализирани техните преимущества и недостатъци. Реализира се добро съгласуване на товарното съпротивление на индуктора с изходния импеданс на инвертора.

Направените симулационни PSpice изследвания на различни схеми на преобразуватели с приложение за индукционно нагряване на вода, дават възможност да се направи съпоставка на работата на основните групи резонансни инвертори: еднотактни инвертори - последователен и паралелен; двутактни инвертори - полумостов и мостов инвертор. При изменение на работната честота, сравнение на енергетични качества (η , P_z) се стига до заключението, че по-приложим е последователния резонансен инвертор в мостова схема. Най-подходящият режим на работа се получава при коефициент на запълване $\delta \approx 0,9$ и неговото регулиране в малки граници.

Изследванията се отнасят за случаи на нагряване на вода под 80°C , където отсъстват сериозни динамически натоварвания при рязка промяна на товара.

Въз основа на предимствата на мостовите резонансни инвертори с товар последователен и паралелен трептящ кръг е синтезирана схема с комбиниран последователно-паралелен товар с различен характер LLC и LLC, което дава възможност да се утвърди схемата с по-добри енергетични показатели - LLC инвертор за индукционно нагряване на вода. Процесите, които се получават в комплексния LLC товар са усложнени, като комбинация от тези в отделните самостоятелни трептящи кръгове и се констатира, че най-подходящият режим на работа се получава при горната граница на диапазона на необходимата изходна мощност, където стресът на елементите е най-малък и коефициентът на полезно действие е най-висок.

Направената оптимизация на схемата на резонансния LLC инвертор за индукционно нагряване на флуиди и нейното подробно изследване, довеждат до разделяне на индуктора на две части - обединявайки товар, имащ характер на последователен и паралелен трептящ кръг. Удачно в разглеждания случай се оказва свързване на двете бобини последователно и свързването на комутиращия кондензатор паралелно само на едната. Така реализирания резонанс е комбинация от последователен и паралелен тип. Индукторът се изработва с допълнителен (среден) извод, като двете бобини са разположени върху различни части от тръбата, с което се реализира слаба магнитна връзка между тях. Наличието на кондензатор, паралелно включен на част от индуктора, прави инверторът с мека комутация по ток.

Получените резултати при изследване на модела на предложението в дисертацията LLC резонансен инвертор, сравнени с тези на най-приложим от другите автори последователен резонансен LC инвертор показват:

- сумарната мощност в индуктора удовлетворява изискванията за постигане на достатъчно нагряване при максимален дебит на водата и е получена 4% по-голяма мощност при LLC инвертора;
- по-ниски загуби в силовите ключовете и по-ниски динамични натоварвания има при LLC инвертора в диапазона на изменение на мощността;
- коефициентът на полезно действие на LLC инвертор надвишава този на последователния LC инвертор, средно с (4÷5)%;
- секционирването на индуктора води до по-добри енергетични показатели;
- комплексната оценка на енергийните и електротехнически показатели на изследваните схеми, показва определени предимства на LLC инвертора.

Математическото изследване показва, че последователно-паралелният LLC резонансен инвертор е работоспособен в широк диапазон на изменение на изходната температура T_o ($15\text{ }^{\circ}\text{C} \div 80\text{ }^{\circ}\text{C}$), а за работния участък на битовия бойлер ($40\text{ }^{\circ}\text{C} \div 60\text{ }^{\circ}\text{C}$), изменението на мощността P_o има линеен характер.

Недостатък на предложената схема е, че формата на тока през транзисторите в режим на дълбоко регулиране при промяна на работната честота не е синусоидална. Това води до получаване на нелинейна характеристика на изменение на тези токове в диапазона на регулиране, дължащо се на сложната конфигурация на резонансния LLC кръг.

Проучени са голям брой схеми с различно регулиране, водещи до заключението, че методите за честотно регулиране на изходната мощност на резонансния инвертор се използват широко при апаратурите за индукционно нагряване на вода. Основават се на затихване в последователния резонансен контур, който е товар на резонансния инвертор и консумира само активна мощност на резонансна честота. Направените сравнителни оценки са основа за изследване на подходящи методи за регулиране на температурата при индукционното нагряване показват:

- за големи мощности е подходящо използването на многозвенни преобразуватели;
- честотният метод за регулиране на изходната мощност на резонансния инвертор дава добри енергетични характеристики за LLC резонансен инвертор;
- при амплитудния метод изследването е с добри показатели, като недостатък е усложнената схема;
- изследван е параметричният метод при резонансен инвертор за регулиране на LLC резонансен инвертор и енергетичните характеристики са много добри, което утвърждава използването му при степенно регулиране на изходната мощност;
- най-подходящ от всички методи за регулиране е време-импулсният метод на LLC резонансен инвертор за индукционно нагряване на вода, като

дава най-добри показатели в сравнение с другите методи, по-плавно става самото регулиране и не се нарушава формата на сигналите. Процесът на управление е ефективен в целия диапазон на достигане на максималната изходна мощност и се постигат и ниски натоварвания на силовите елементи.

ОСНОВНИ ПРИНОСИ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. Предложена е методика за изчисление на габаритните размери на индуктор в система за индукционно нагриване. Изведени са математически зависимости на електрическите параметри на индуктора във функция от габаритните му размери. Допълнена е общата формула за изчисление на индуктивност - желязна сърцевина, в съответствие с използвания тръбен индуктор, чрез въведения коефициент k_6 , в зависимост от габаритните размери на избрания индуктор и режима на работа на инвертора (2.19).

2. Синтезирана е еквивалентна заместваща схема на индуктора за симулация на изследвани параметри, специфично приложими при индукционно нагриване на вода. Изведена е зависимост на активното еквивалентно съпротивление на индуктор, отразяващо нагриващото действие на металната тръба от токовете на Фуко и е показана методика за изчислението му.

3. Предложена е методика за проектиране на LLC резонансен мостов инвертор за индукционно нагриване на вода. Изведени са изчислителните зависимости за избрания тип LLC резонансен инвертор. Въведен е коефициентът – k_7 за избор на комутиращ кондензатор в LLC резонансен инвертор. Въведен е коефициент за магнитна индукция на индуктора – k_6 в зависимост от габаритните размери на избрания индуктор и режима на работа на инвертора.

4. Изследвани и сравнени са параметрите на работа на LLC инвертор и LC инвертор за нагриване на вода и в резултат са доказани:

- по-ниски загуби в силовите ключовете и по-ниски динамични натоварвания има при LLC инвертора;
- коефициентът на полезно действие на LLC инвертор надвишава този на последователния LC инвертор средно с (4÷5)%;
- комплексната оценка на енергийните и електротехнически показатели на изследваните схеми показва определени предимства на LLC инвертора.

5. Определена е зависимостта на температурата от мощността на инвертора за битов бойлер при различни дебити на водата.

6. Предложена е класификация на методите за регулиране на резонансни инвертори за индукционно нагриване. Изведени са експериментално зависимости, осигуряващи приложението на разгледаните методи за регулиране на резонансни инвертори за индукционно нагриване в практиката (честотно, амплитудно, времеимпульсно и параметрично регулиране).

7. Разработена е методика за експериментално изследване и са установени изискванията към функционалността на опитната постановка.

Проведените реални експерименти и получени резултати са верифицирани с получените чрез симулации, графики и зависимости на система за индукционно нагряване.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Резултатите от симулационните и практическите изследвания представени в дисертационния труд показват, че е избрана работеща система за индукционно нагряване на вода.

Разработени са: методика за проектиране и избор на индуктор, методика за проектиране на инверторния блок, избран е метод за регулиране на температурата на течащата вода и е разработен експериментален лабораторен модел на проектираната уредба. Получените и избрани стойности на елементите на лабораторния макет са изследвани с PSpice симулация, експериментални изследвания и са верифицирани получените резултати.

Направеното в дисертационния труд може да послужи по-нататък за доразработване на промишлен образец и внедряването му в различни обекти и да послужи за обучение на магистри и докторанти по силова електроника.

НАУЧНА И СОЦИАЛНА ПРИЛОЖИМОСТ НА РЕЗУЛТАТИТЕ ОТ ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Създадените методики на проектиране, методите за симулация и доказалият ефективната си работа LLC резонансен инвертор биха намерили приложение в бъдещи изследователски и практически инженерни проекти. Предложената опитна система притежава елементи на практическа новост и може да се внедри при обучението на студенти и докторанти, както и да се използва за бъдеща изследователска работа.

Публикации по темата на дисертацията

1) Юдов Д., **Марева Д.**, Марев Е. „Приложение на еднотактни инвертори за индукционно нагряване на флуиди” - Годишник том VII, БСУ, Бургас, 2002, стр.111-116

2) Юдов Д., **Марева Д.**, Димитров Ат. „Влияние на инверторен източник за индукционно нагряване върху захранващата мрежа”- Научна конференция на тема: „Предизвикателства пред образованието и науката в контекста на глобализацията”, 11÷13 юни, БСУ, Бургас, 2004, стр.262-267

3) Юдов Д., **Марева Д.** „Инверторен токоизточник в система за индукционно нагряване на флуиди ”- Научна конференция на тема: „Съвременни технологии 06”, 27÷28 април, Дряново, 2006, стр.58-65

4) Юдов Д., **Марева Д.** „Многозвенен инвертор в система за индукционно нагряване на флуиди”- Научна конференция на тема: „Съвременни технологии 2007”, 5-6 юли, БСУ, Бургас, 2007, стр.143-148

5) **Mareva D**, Yudov D. „Inverter for induction heating with improved power factor correction” -XVI-th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies, SIELA 4-6 June 2009, Bourgas, Bulgaria, ISBN 978-954-323-530-8, pp.201-207

6) Юдов Д., **Марева Д.**, Марев Е. „Автономен инвертор за индукционно нагряване на вода”- Научна конференция с международно участие „Предизвикателства пред висшето образование и научните изследвания в условията на криза”, 25-26 юни, БСУ, Бургас, 2010, том III, стр.138-145

7) Юдов Д., **Марева Д.** „Регулиране на изходната мощност на автономен инвертор за индукционно нагряване на вода”- Научна конференция с международно участие „Предизвикателства пред висшето образование и научните изследвания в условията на криза” , 25-26 юни, БСУ, Бургас, 2010, том III, стр.18-23

8) **Mareva D.J.**, D.D. Yudov, E.M. Marev „Inverter for Induction Heating of Fluids” – The XIX International conference „ELECTRONICS ET’2010”, volume 4, number1, ISSN1313-1842, Sozopol, 2010, b1, pp.204-207

9) [146] **Марева Д.** „Развитие на индукционното нагряване на флуиди”- Годишник, том XXIII, БСУ, Бургас 2010, стр.269 -276

10) **Марева Д.**, Юдов Д. „LLCC инвертор за индукционно нагряване на флуиди” - Научна конференция с международно участие „Взаимодействието теория-практика: ключови проблеми и решения”, 24-25 юни, БСУ, Бургас, 2011, том III, стр.126-132

11) **Марева Д.**, Марев Е. „Изследване чувствителността на LLCC инвертор за индукционно нагряване ”- Научна конференция с международно участие „Взаимодействието теория-практика: ключови проблеми и решения”, 24-25 юни, БСУ, Бургас, 2011, том III, стр.133-140

12) **Mareva D.J.**, Marev E. M., Yudov D.D. „Combined Regulation of Inverter for Induction Heating” – The XX International conference „ELECTRONICS ET’2011”, volume 5, number1, ISSN1313-1842, Sozopol, 2011, b1, pp.208-211

13) **Марева Д.**, Марев Е. „Силови полупроводникови елементи в схемите за индукционно нагряване на флуиди”- Годишник том XXV, БСУ, Бургас, 2011, стр.47-58

14) **Марева Д.**, Марев Е. „Развитие на силовите полупроводникови елементи в схемите за индукционно нагряване на флуиди ”- Годишник том XXV, БСУ, Бургас, 2011, стр.59-65

15) **Марева Д.**, Юдов Д., Марев Е. „Инвертор за индукционно нагряване на флуиди с подобрени енергийни показатели” – Трети международен научен конгрес „50 години ТУ- Варна”, 04-06 октомври, ТУ Варна, 2012, стр. 180-184

16) **Марева Д.**, Юдов Д., Марев Е. „Проектиране на индуктор за нагряване на флуиди ” – Годишник том XXVII, БСУ, Бургас, 2012, стр.285-292

17) **Марева Д.**, Юдов Д., Марев Е. „Съгласуване параметрите на индуктора за нагряване на флуиди с параметрите на автономния инвертор” - Електронно списание "Компютърни науки и комуникации", първи брой, ISSN: 1314-7846, БСУ, Бургас, декември 2012

- 18) **Марева Д., Юдов Д., Мареv Е.** „Изследване на LLC инвертор за индукционно нагряване на флуиди” - Научна конференция с международно участие „Знанието – традиции, иновации, перспективи”, 14-15 юни, БСУ, Бургас, 2013, стр.87-96
- 19) **Mareva D.J., Yudov D.D., Marev E. M.** „Simulation research of Serial and LLC Resonant Inverters for Induction Heating of Fluids”-The XXII International conference „ELECTRONICS ET’2013”, Sozopol 2013, Annual journal of Electronics, volume 7, ISSN 1314-0078, pp.148-151
- 20) **Mareva D.J., Marev E. M., Yudov D.D.** „Single-Ended Inverters for Induction Heating of Fluids” **978-1-4799-5817-7/14/\$31.00 ©2014 IEEE**, XVIII-th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies, SIELA, 29-31 may, 2014, pp.69-70
- 21) **Марева Д., Юдов Д.** „Регулиране на температурата при индукционно нагряване на вода” - Научна конференция с международно участие „Хоризонти в развитието на човешките ресурси и знанието”, 12-13 юни, БСУ, Бургас, 2015
- 22) Юдов Д., **Марева Д., Вълчев В.** ”Мултирезонансен преобразувател за работа при противо Е.Д.Н.”- Научна конференция на тема:”Икономика на знанието”, БСУ, Бургас, 2008