

## АВТОНОМЕН ИНВЕРТОР ЗА ИНДУКЦИОННО НАГРЯВАНЕ НА ВОДА

Даниела Марева, Димитър Юдов, Емил Марев  
Бургаски Свободен Университет

## AUTONOMOUS INVERTER FOR INDUCTION HEATING OF WATER

Daniela Mareva, Dimitar Yudov, Emil Marev

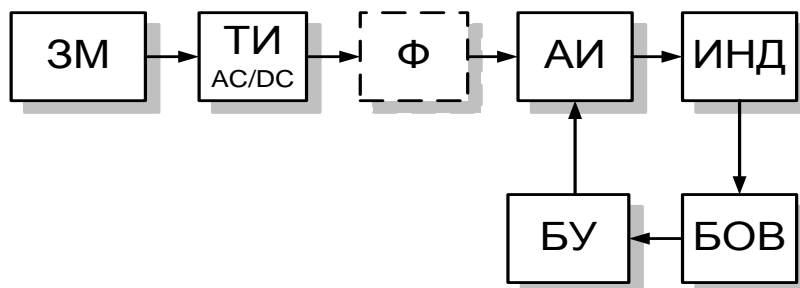
**Abstract:** *The paper presents a high efficiency conception and analysis of resonant converters for induction fluid-heating applications in the system using soft switching high frequency inverter. After an analysis of the different modes: halfbrige and fullbrige was done a comparison and study for optimum of parameters. Some parameters in the inverter are calculated and the conception of resonant converters for induction heating applications is presented.*

**Keywords:** *resonance inverters, ZVC, induction heating of water.*

През последните години нараства използването на индукционното нагряване на флуиди, поради редица преимущества пред традиционните методи за нагряване [ 6,7 ]:

- ❖ Времето за нагряване и реакция е много кратко, постига се много бързо нагряване.
- ❖ Разпространението на топлината във водата става много по-бързо отколкото конвенционалните.
- ❖ Няма пряк контакт между нагряващия прибор (индуктор) и флуида (течност, газ) .
- ❖ Нагряващата повърхност е много голяма, което води до хомогенно нагряване в целия обем.
- ❖ Лесно се измерва температурата на протичащия в тръбата флуид - на входа и на изхода. Може да се реализира прецизен температурен контрол, бързи реакции и лесна автоматизация. Температурният обхват на регулиране на нагрявания флуид в тръбопровода е много широк от ниската до високата температура (от топла вода до пара).
- ❖ Висока плътност на мощността, компактни са по размери и с малка маса, отсъстват отпадъчни продукти.
- ❖ Не образува котлен камък, което увеличава жизнения цикъл на цялата инсталация.
- ❖ Индукционното нагряване може да нагрява локално място.

Блоквата схема на източник за индукционно нагряване на вода се състои от токоизправител (AC/DC) , инвертор (DC/AC) и блок за обратна връзка и управление (фиг.1).



Фиг.1. Блокова схема на източник за индукционно нагряване на вода

Основен блок е инвертора, чийто правилен избор определя енергетичните показатели на цялата система.

Предмет на настоящата статия е избор и обосновка на инверторен източник за индукционно нагряване на вода (бойлер) за битови нужди.

Главните съображения при избора на инверторния токоизточник са свързани с определянето на работната честота, температурата до която се нагрява водата и нейния дебит.

Нормално за битов бойлер за къпане дебита е в границите от 1-2 l/s при нагряване на водата от 15÷20°C до 45÷60°C.

Изходната мощност на индуктора се определя от зависимостта [4]

$$(1) \quad P_n = \Delta m \cdot C_p \cdot (T_o - T_i) \quad [kW]$$

Където:

$\Delta m$  – дебит на водата kg/s (4l/s)

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

$T_o$  – изходна температура K; (293 K)

$T_i$  – входна температура K; (323 K)

За конкретния случай изчисленията показват  $P_n=6,5KW$

Изборът на работната честота се определя от конструктивните особености на индуктора и от дълбочината на проникване ( $\delta$ ) в металните нагрявани повърхности на индуктора и честотните свойства на използваните активни и реактивни елементи.

$$(2) \quad \delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \cdot \mu \cdot f}} \quad , [m]$$

където:  $\rho$  - специфична проводимост [ $\Omega \cdot m$ ];

$\mu$  – магнитна проницаемост [H/m] ( $\mu = \mu_o \cdot \mu_r$ );

$f$  – работна честота [Hz];

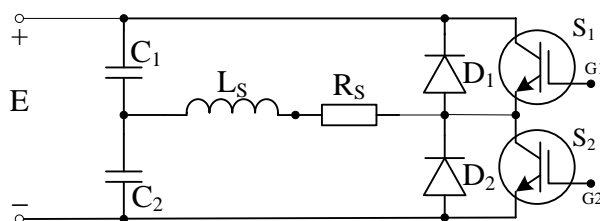
От обзора при  $f=25\text{kHz}$  за стомана /  $\rho=0,16[\mu\Omega.m]$  и  $\mu_r=100$  при  $20^\circ\text{C}$ / получаваме  $\delta=0,15\div 0,18\text{mm}$ .

Индукторът за нагряване на вода обикновено се реализира от неметална тръба с поставени вътре тънки ламаринени пластини [6], които се нагряват индукционно и предават топлината на обтичащата ги вода.

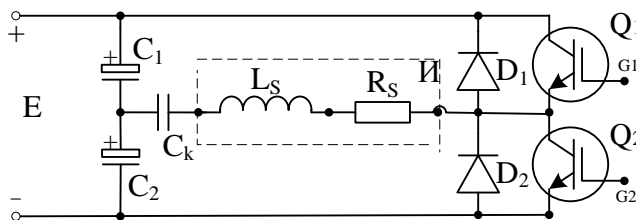
С цел максимален топлообмен и максимална площ на металната повърхност на индуктора изборът на дебелината на металните пластини ( $d$ ) е:

$$(3) \quad d = (2\div 6)\delta, [mm]$$

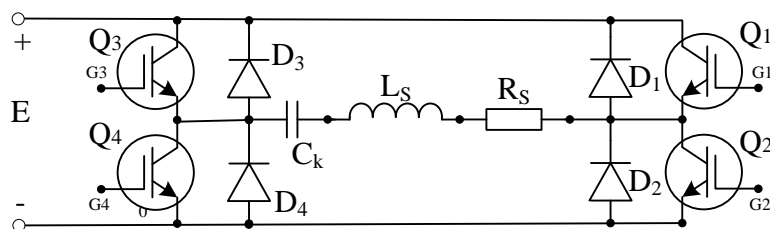
При тези изходни данни подходящи са резонансни транзисторни инвертори с мостова или полумостова схема. Полумостовата схема може да бъде с разделителен комутиращ кондензатор или разделен захранващ източник.



Фиг.2. Полумостова схема с разделителен комутиращ кондензатор



Фиг.3. Полумостова схема с разделен захранващ източник



Фиг.4. Мостова схема

Целта на изследването е да се определи най-подходящата схема и най-добрия режим на работа за посочените параметри на индукционно нагряване на вода.

Сравняването на схемите е извършено при еднакъв индуктор и комутиращи реактивни елементи. В случая  $L_s$ ,  $R_s$  са параметрите на индуктора,  $C_k$  - кондензатора в резонансния кръг.

Изчислението на елементите на инвертора се извършва по формулите:

Изчисление на инвертора:

1. Определяне параметрите на индуктора:

Връзката между тока, напрежението и мощността на индуктора е:

$$(4) \quad P_{\text{H}} = U_{\text{H}} \cdot I_{\text{H}} \cdot \cos\varphi ,$$

$\cos\varphi$  характеризира реактивния характер на индуктора и според редица литературни източници се изменя в границите  $0,20 \div 0,33$ .

Напрежението върху индуктора зависи силно от качествения фактор (Q) на резонансния кръг ( $L_s, R_s, C_k$ ).

$$(5) \quad U_u \approx Q \cdot E$$

Обратно пропорционално на захранващото напрежение (E) качествения фактор се избира в границите:

$$(6) \quad Q = 2 \div 4.$$

Комплексният импеданс на индуктора се определя от:

$$(7) \quad Z_{\text{H}} = \frac{8 \cdot E^2 \cdot Q^2 \cdot \cos\varphi}{\pi^2 P_{\text{H}}} ,$$

където:  $Z_{\text{H}} = R_{\text{H}} \cdot \cos\varphi + jX_{\text{H}} \cdot \sin\varphi$

$$(8) \quad L_{\text{H}} = \frac{X_{Lu}}{\omega_o} = \frac{\omega \cdot X_{Lu}}{a}$$

$$a = \frac{\omega}{\omega_o} = \frac{f}{f_o} = \frac{T_o}{T}$$

където:

$\omega$  - работна честота на инвертора;

$\omega_o$  - резонансна честота на колебателния кръг.

2. Определяме стойността на резонансния кондензатор:

$$(9) \quad C_k = \frac{1}{L_{\text{H}} \omega_o^2} = \frac{a^2}{\omega^2 L_{\text{H}}}$$

От дадените зависимости са получени следните стойности за елементите на инвертора, които се използват при PSPICE симулацията на трите посочени схеми:

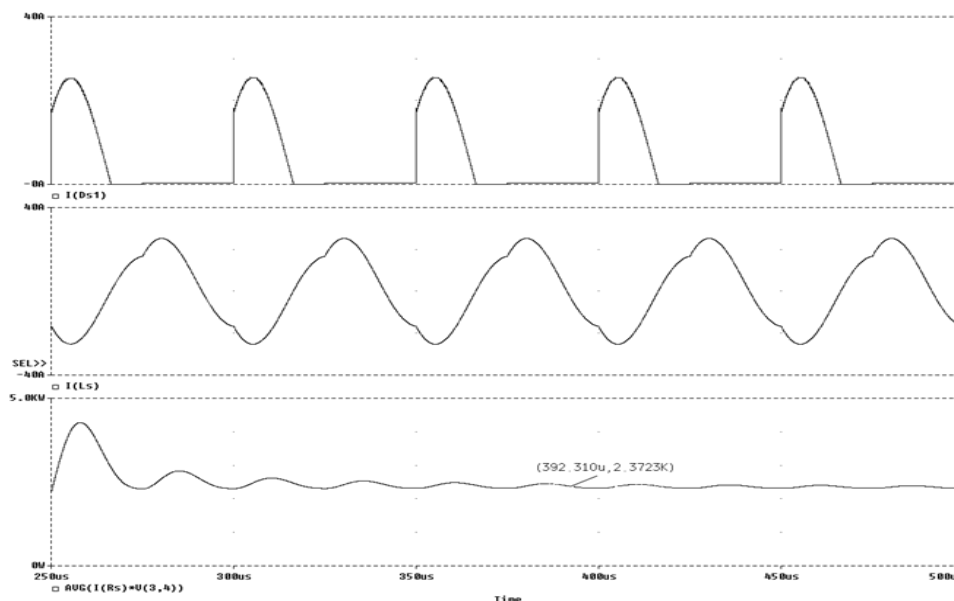
$$E=300\text{V}, Z_{\text{H}}=15\Omega, L_{\text{H}}=84\mu\text{H}, R_{\text{H}}=6\Omega, C_k=0.3\mu\text{F}, f=25\text{kHz},$$

Трите схеми са изследвани посредством програмния продукт PSPICE при получените стойности на индуктора и комутиращия кондензатор и са сравнени по следните показатели :

- натоварване на транзисторите;
- ток през индуктора;
- активна мощност в индуктора.

За приетите показатели полумостовите схеми (фиг.2 и фиг.3) имат еднакви стойности. Това дава основание да се сравняват полумостовата схема (фиг.2) и мостовата схема (фиг.4).

За полумостовата схема (фиг.2) са дадени времедиаграмите на тока през транзисторите, през индуктора и изходната мощност.

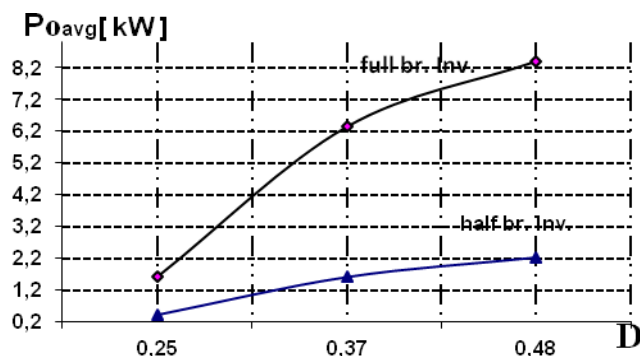


Фиг.5. Времедиаграми на тока през транзисторите, през индуктора и изходната мощност

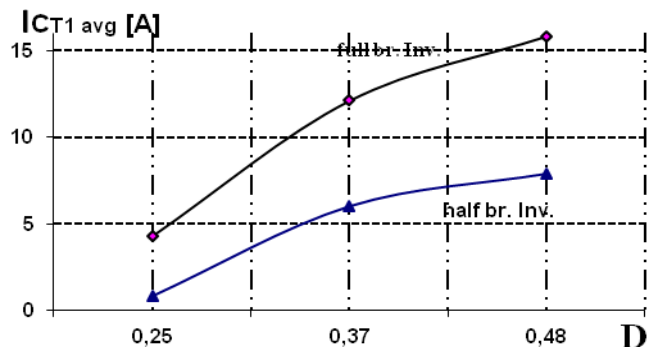
От времедиаграмите се вижда че, инверторът функционира нормално, токът през транзисторите има ненулева стойност при включване и нулева стойност при изключване. Изходната мощност е в проектираните граници.

**От симулационните изследвания са получени следните резултати.**

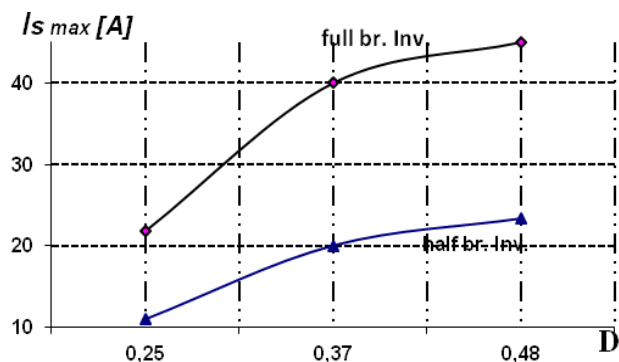
А. При изменение на  $D = \frac{t_u}{T}$ ,  
където  $t_u$  е времето на отпушения транзистор, а  $T=1/f$ - периодът на работната честота.



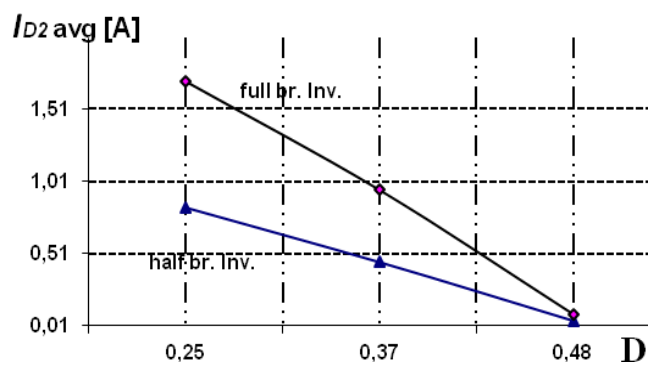
Фиг.6. Времедиаграми на средната стойност на изходна мощност на мостов и полумостов инвертор



Фиг.7. Времедиаграми на средната стойност на тока през транзистора  $T_1$



Фиг.8. Времедиаграми на тока през товара

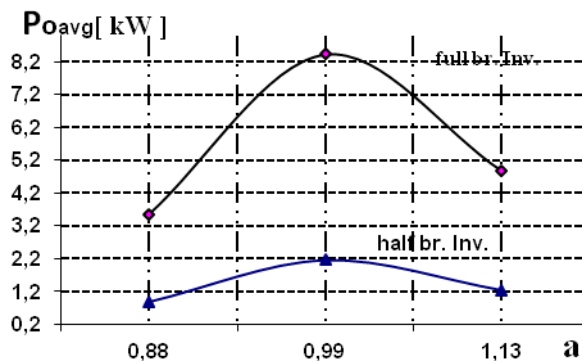


Фиг.9. Времедиаграми на средната стойност на тока през диода  $D_2$

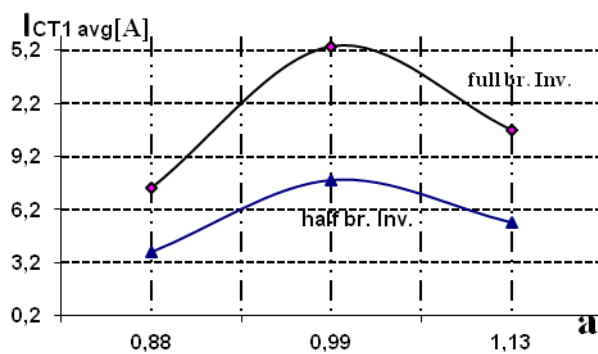
От коефициента на запълване  $D$  се виждат възможностите за регулиране на изходната мощност и натоварването на елементите на схемата.

$$a = \frac{\omega}{\omega_0}$$

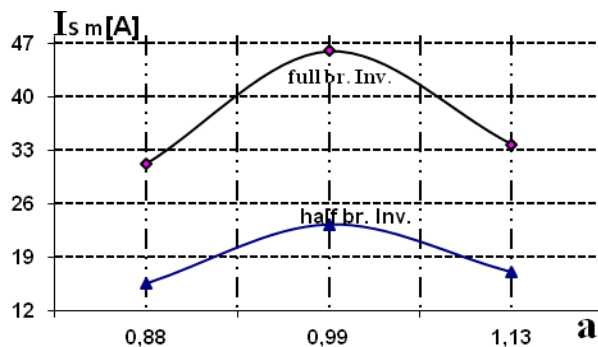
В. При изменение на  $\omega/\omega_0$ . Коефициентът „a” отразява отношението между работната и резонансната честоти и определя режима на работа на инвертора.



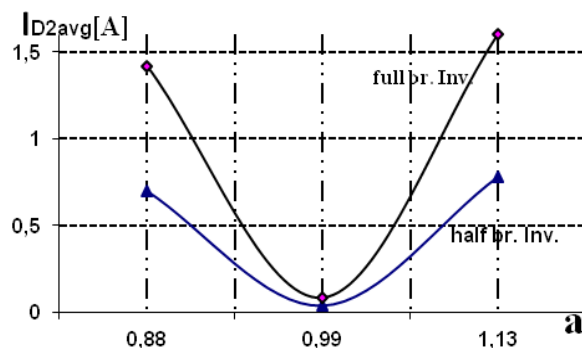
Фиг.10. Времедиаграми на средната стойност на изходна мощност на мостов и полумостов инвертор



Фиг.11. Времедиаграми на средната стойност на тока през транзистора  $T_1$



Фиг.12. Времедиаграми на тока през товара



Фиг.13. Времедиаграми на средната стойност на тока през диода  $D_2$

От коефициента „a” се вижда силно изразена нелинейна зависимост, което предполага необходимостта от точен избор на съотношението между работна и резонансна честоти.

#### Изводи:

От двете изследвания се вижда:

1. Характерът на изменение на изследваните показатели на мостовата и полумостовата схеми са еднакви.
2. Мощността в индуктора при мостовата схема е 4 пъти по-голяма при максималните им стойности.
3. Токът през индуктора и през транзисторите е около 2 пъти по-голям при мостовата схема.
4. Токът през обратните диоди силно зависи от избрания режим на работа и при максимална мощност се изравняват и имат минимални стойности.
5. От направения анализ за индукционно нагряване на вода се избира мостова схема на резонансен инвертор. Най-подходящият режим на работа се получава при  $a \approx 1$  и регулиране на коефициента на запълване  $D$ .

#### Литература:

1. Kubota Sachio “ A Novel ZCS High-Frequency Power Supply for Induction Heating” , IEEE 1998
2. Филчев Т., Юдов Д., Бъчваров Ж. “Индукционно нагряване на флуиди”, Национална научно-приложна конференция “ЕТ-2000”, 20-23 септември, гр. Созопол
3. Юдов Д., Филчев Т., Вълчев В. “Приложение на инверторен източник за индукционно нагряване на вода”,
4. Тодоров Т., Маджаров Н., Алексиев Д., Иванов П. “Автономни инвертори” , Габрово 1996г.
5. Sugimura H., Tarek A., Nakaoka M. “Commerical Utility Frequency AC to High-Frequency AC Soft Switching Power Conversion Circuit with Non Smoothing DC Link for IH Dual Packs Heater” , IEEE 2004
6. Sugimura H., Muraoka H., Nakaoka M. “ A Novel Soft Switching PWM Power Frequency Converter with Non DC Smoothing Filter Link for consumer High-Frequency Induction Heting” , IEEE 2004