

СИСТЕМА ЗА УПРАВЛЕНИЕ ПРИ ПРОМЕНЛИВ ТОВАР ЗА ИНДУКЦИОННО НАГРЯВАНЕ

доц. д-р Минчо Ванев Симеонов, инж. Иван Петров Новаков, инж. Доброслав
Данаилов Данков, д-р инж. Евелин Цонев Цонев¹, инж. Димитър Делчев
Митев

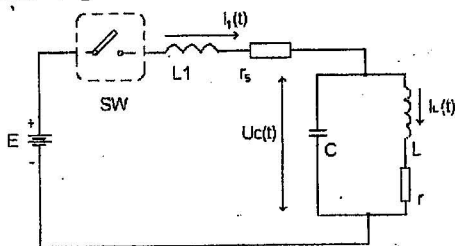
Технически Университет – Габрово катедра “Електроника”
¹ ВВУ “В.Левски” - Велико Търново

Simeonov M.V., Novakov I.P., Dankov D.D., Tzonev Tz.E., Mitev D.D. Controls system with variable parameters of load for induction heating This report presents the development of adjustable control system with variable parameters of load for induction heating. The control is based on PLL system, which changes swishing frequency due to the variation of load parameters. The system is capable to vary the values of the load to keep optimal mode to ZCS "soft swishing".

За захранващи източници в индукционното нагряване се използват и квази-резонансни инверторни схеми с “мека” комутация при нулев ток и напрежение (ZCS или ZVS) на мощните ключови прибори [2,4]. За тези режими на работа са характерни ниски комутационни загуби в транзисторите и близки до синусоидалната форма на тока или напрежението през/върху тях. Резонансният процес, респективно “меката” комутация на ключовите прибори се определя и от еквивалентните параметри на системата индуктор - детайл, които в процеса на индукционно нагряване се изменят в широки граници. За запазване на избрания режим на работа, на технологичния режим, е необходимо захранващият източник на тази система да реагира по подходящ начин на измененията и. В повечето случаи решението е с управляващи системи да се следят електромагнитните процеси и се поддържат зададените параметри както на технологичния процес, така и на избрания комутационен режим на работа на транзисторите в инверторната схема. Много от съвременните разработки са насочени в създаване на “интелигентни системи за управление” следящи и контролиращи параметрите в процеса на работа [1]. Несъмнено това изисква залагане на избран алгоритъм на работа, изследван и изучен посредством методите за анализ в цялата си взаимовръзка.

Цел на доклада е представянето на система за управление на квази-резонансен транзисторен инвертор гарантиращ работа на инвертора в ZCS комутация при промяна параметрите на товара.

Несъмнено е, че първостепенна задача е установяването на взаимовръзките на електромагнитните процеси в товарния трептящ кръг и тези определящи развитието на резонансни токове и напрежения през транзисторните ключове. Единно решение на тази задача е трудно, явно защото е свързано с топологията на инверторните схеми, с режимите на работа и индукционните технологични процеси. В една част от тези варианти - при квази-резонансен едноклучов инвертор с паралелно – последователен трептящ кръг, общата еквивалентна схема има вида показан на фиг. 1.



Фиг.1

Системата индуктор - метал е представена с еквивалентните си параметри L и r , а кондензаторът C образува товарният резонансен кръг. С $L1$ и r_s се представят входната индуктивност и активните съпротивления в последователната верига.

В предидущи публикации[3,4] е направен анализ на електромагнитните процеси и са решени токовете и напреженията за двете състояния на схемата:

- Еквивалентна схема(фиг.1) валидна за интервала $(k-1)T < t < (k-1)T + \lambda$, където $k = 1, 2, 3, \dots \Rightarrow$ пореден N на периода при който транзистора е отпушен.

При отпушващ импулс към ключа SW се включва захранващия източник E към паралелно – последователен трептящ кръг. За времето на отпушено състояние на транзистора $(k-1)T < t < (k-1)T + \lambda$ протича колебателен процес на зареждане на кондензатора C с честота ω

$$\lambda = \frac{T}{2} = \frac{\pi}{\omega} \quad \dots(1)$$

Токът $I_1(t)$ има резонансен характер. Стойностите на елементите от еквивалентната схема и началните условия определят времето на протичащия ток през транзистора, неговата амплитуда. При изпълнение на условието:

$$I_1(t = \lambda) = 0 \quad \dots (2),$$

транзисторът SW ще работи в режим на ZCS.

Продължителността на отпушващият импулс U_{GS} е равна на полупериода на комутационната честота ω

В дефинирания интервал, схемата от фиг.1 се описва със следните интегро-диференциални уравнения:

$$\begin{cases} \frac{du'_c}{d\theta} = i_1' - i_L' + u'_c(0) \\ \frac{di'_1}{d\theta} = \frac{u'_c}{\zeta^2 n} - \frac{m}{Q\zeta n} i_1' + \frac{1}{\zeta^2 n} \\ \frac{di'_L}{d\theta} = \frac{1}{\zeta^2} u'_c - \frac{1}{Q\zeta} i_L' - i_L'(0) \end{cases} \dots(3),(4),(5)$$

Възприети са отношенията:

$$n = \frac{L_1}{L}; m = \frac{r_s}{r}; \zeta = \frac{\omega}{\omega_0}; \dots(6)$$

и променливите в относителни единици

$$t = \frac{\theta}{\omega}; i_1' = \frac{i_1(t)}{E\omega C}; u'_c = \frac{u(t)}{E}; Q = \frac{\omega_0 L}{r}; \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \dots(7)$$

Началните условия се определят за края на всеки полупериод от решенията на електромагнитните процеси валидни за схемата от фиг.1.

$$i_1'(0) = I_1(t_{01} = \lambda) = 0 \Rightarrow \text{по избран алгоритъм на работа}$$

$$i_L'(0), u'_c(0) \Rightarrow \text{за } \theta = (k-1)2\pi$$

- *Еквивалентна схема валидна е за интервала $(k-1)T + \lambda < t < kT$, където $k = 1, 2, 3, \dots \Rightarrow$ пореден N на периода. Транзисторът е запушен.*

Колебателният процес след запушване на транзистора се развива с резонансна честота ω_0 различна от ω . Колебателният процес се развива винаги от ненулеви начални условия

$$u_c(0) > 0 \text{ и } i_L(0) > 0$$

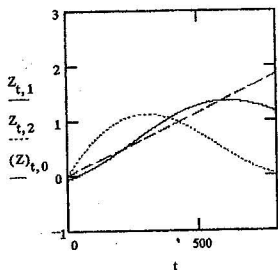
Анализът и решението на електромагнитните процеси е представено в предишната публикация [3], по уравнението:

$$\frac{d^2 i_1'}{d\theta^2} + \frac{1}{Q} i_1' + \frac{1}{\zeta^2} i_1' = 0 \dots(8)$$

Решението на системата диференциални уравнения (3)...(5) и (8) за посочените интервали е извършено чрез програмен продукт MAPLE VI, като решенията са при следните стойности:

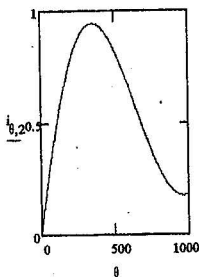
$$\zeta = 1,07; Q = 2,45; n = 0,366; m = 0,395 \dots(9)$$

При промяна параметрите на товара, респективно на n , Q , m и ξ , инверторът преминава от режим на комутация при нулев ток (ZCS)- фиг.2(крива Z_{c2}), в режим на на "твърда комутация" - фиг.3 и фиг.4.

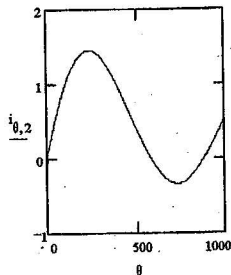


$Z_{t,1}=I_L$; $Z_{t,2}=I_{D,S}$; $Z_{t,0}=U_C$

Фиг.2



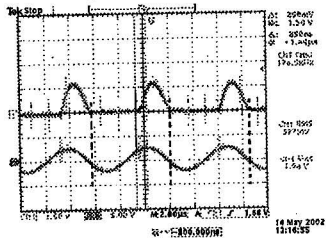
Фиг.3



Фиг.4

От предварителните резултати получени чрез решение на изведената система диференциални уравнения (3)...(5) и (8) с метода на точния анализ, както и от достатъчно голяма база експериментални

резултати бе определено условието за работа на инвертора в ZCS комутация. От заснет режим на транзистора в "мека" комутация се наблюдава едновременното намаляване и нулиране на тока през индуктора i_L и транзистора i_d - фиг.5. От направеният енергиен баланс на схемата (не поместен тук) е доказано че при такова състояние



фиг. 5 Ток през индуктора i_L и транзистора i_d

на схемата и развитие на електромагнитните процеси кондензатора от товарният трептящ кръг е зареден с максимална енергия.

Горните условия правят приложима схемата Phase Lock Loop(PLL) за синтезиране на затворена система за управление с фазово автоматично регулиране на честотата с обратни връзки за определените два тока - през индуктора i_L и транзистора i_d и при дефазирание ще се задава необходимата работна честота ω .

Принципната схема на системата за управление е показана на фиг.6. Входните сигнали за нея са формирани във вид на правоъгълни импулси, като вместо тока на транзистора i_d се използват управляващите импулси U_G , а сигнала за сравнение i_L се формира като напреженов импулс с правоъгълна форма и амплитуда 15V.

Допълнително условие за работата на адаптивната система за управление е изискването да бъде зададен очакван честотен диапазон, съобразно измененията еквивалентните параметри в товара. Това поначало ограничаващо условие изисква да се зададат ω_{min} и ω_{max} за работата на PLL в границите на който

диапазон, ще се наблюдава промяна на собствената резонансна честота ω_0 на паралелният третият кръг във връзка с заложения индукционен процес.

За разлика от класическото приложение на PLL за следене дефазирването на два сигнала предложеното схемно решение извършва честотно водене на схемата по промяна на ω респективно промяна параметрите на товара.

Първоначално генерираните импулси от PLL са с минимална честота ω_{\min} . При наличие на фазова разлика между сигналите на тока през индуктора i_L и на тока през транзистора i_d (управляващите импулси U_G) честотата ω нараства до съвпадението на нулите им - установява се работната честота ω . Процеса на установяване в номинален работен режим с "мека" комутация е в рамките на няколко периода.

За гарантиране на ефективната работа на системата е предвидена токова и напреженова защита на инверторната схема.

Изложените по-надолу част от експериментални резултати потвърждават решението на поставеният проблем. Системата за управление поддържа в режим на ZCS комутация инвертора, при промяна параметрите на товара.

Използва се индуктор с 6 навивки и диаметър $D = 70 \text{ mm}$.

В доклада са показани четири работни режима със заснети осцилограми (фиг.7-10), за следните четири технологични процеса:

1. Топене на 500g мед в графитен тигел,
време за топене $t=10 \text{ min}$,

входна мощност $P=2500 \text{ VA}$,
работна честота $f=145 \text{ kHz}$

2. Закаляване на стоманена заготовка с диаметър $D = 10 \text{ mm}$,
входна мощност $P=1800 \text{ VA}$

- В начало на технологичния процес - работна честота $f=155 \text{ kHz}$

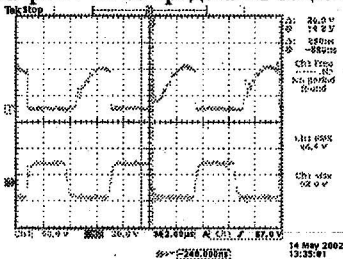
- В края на технологичния процес - работна честота $f=100 \text{ kHz}$

3. Режим на празен ход

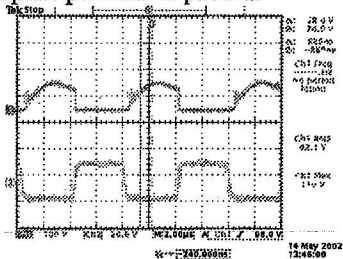
входна мощност $P=370 \text{ kW}$,

работна честота $f=125 \text{ kHz}$

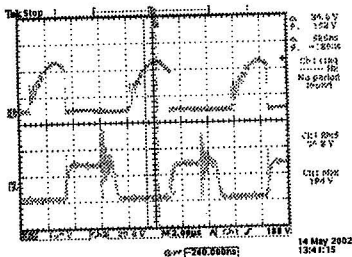
На фиг.7-10 се представят осцилограмите на четирите режима на работа.



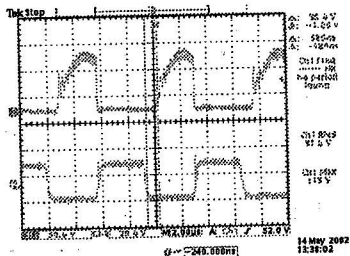
фиг. 7 Топене в графитен тигел



фиг.8 Закаляване на стоманена заготовка (студена)



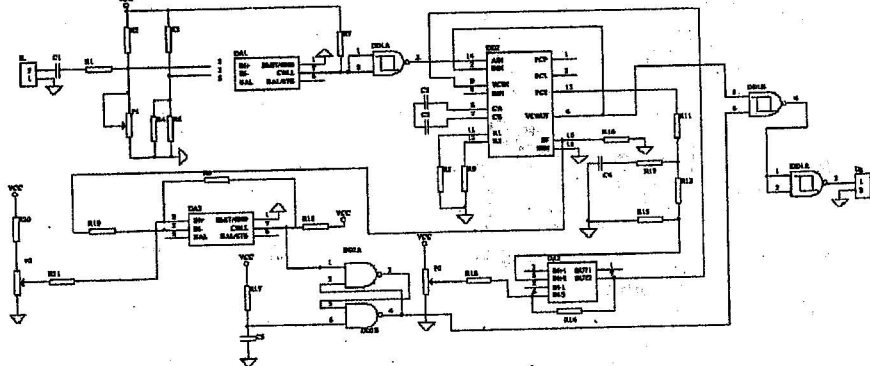
фиг.9 Закаляване на стоманена заготовка (горещца)



фиг. 10 Празен ход

Изводи

Експерименталните резултати представят ефективността на системата за управление в широк диапазон на изменение на параметрите на товара при запазване на режима с ZCS комутация на транзистора в инверторната схема. Едно бъдещо развитие на проблема е математическата обосновка на условията за ZCS комутация чрез метода на точния анализ.



Фиг. 6 Принципна схема на адаптивната система за управление

Литература

1. Grzesik, B., Kaczmarczyk, Z., Kasprzak, M. Control of Class E Inverter with Variable Parameters of the Load. PCIM CONFERENCE, 1999 June 22-24, Nurnberg Germany
2. Rashid, M., Power electronics. Circuit, devices, application.
3. Simeonov M., Dankov D., Inverter class "E" for induction heating with MOSFET transistors. ENERGETSKA ELEKTRONIKA -Ee 97 October 1997 Novi Sad
4. Yang J. Resonant and Quasi-resonant inverters for high-frequency induction heating. Berlin 1995

Доклада е рецензиран от доц. д-р инж А. Александров