

СИСТЕМА ЗА УПРАВЛЕНИЕ НА 6 ФАЗЕН ZVS МНОГОЗВЕНЕН ИНВЕРТОР ЗА ИНДУКЦИОННО НАГРЯВАНЕ

Доброслав Данков*, Петко Маринов

Технически университет - Габрово, ул. "Х. Димитър" 4, Габрово, България

**кореспондиращ автор: dankov@tugab.bg*

CONTROL SYSTEM FOR A 6-PHASE ZVS MULTI-LEVEL INVERTER FOR INDUCTION HEATING

Dobroslav Dankov*, Petko Marinov

Technical University of Gabrovo, 4 Hadji Dimitar str., Gabrovo, Bulgaria

**Corresponding author: dankov@tugab.bg*

Abstract

Induction cookers are becoming increasingly popular due to their high efficiency and fire safety. More and more work is being done to expand their heating zone and enable universal heating of different types of metal cookware. This study is related to the implementation of multi-stage inverters in induction cookers, which are characterized by ZVS switching for low losses and a wide frequency range, as well as stable operation under different loads. The control of these inverters is unconventional and involves the possibility of changing various parameters. The study proposes a control system for a 6-phase multi-link inverter based on simulation studies. An operating algorithm is proposed and a program for digital control of the inverter is implemented using Arduino Due. Real results from the operation of the control system are presented.

Keywords: Induction cookers ZVS switching, 6-phase, multi-level inverter, SiC, MOSFET

ВЪВЕДЕНИЕ

Индукционните котлони (ИК) намират все по голямо разпространение благодарение на високата си ефективност и пожаробезопасност. Разпространени са в бита с мощност до 2kW и температура на нагряване до 200°C. За професионални цели се използват индукционни котлони с единична мощност до 5kW, които обикновено са с по-голям на нагреваемата площ, респективно диаметър на работния плосък индуктор и са с два или три преобразувателя, работещи в паралел. Обикновено се използват ZVS квази-резонансни преобразуватели, работещи без междинно изправяне, цел по-висок фактор на

мощността на захранване от мрежата [1]. Едно от направленията в които се работи е за разширяване на нагревателната зона на ИК, като се използват главно две концепции. Първата е свързана с разделяне на секции кръглата намотка на индуктора и превключване на отделните секции в зависимост от диаметъра на съда за да се създаде т.н. зонно нагряване [2].

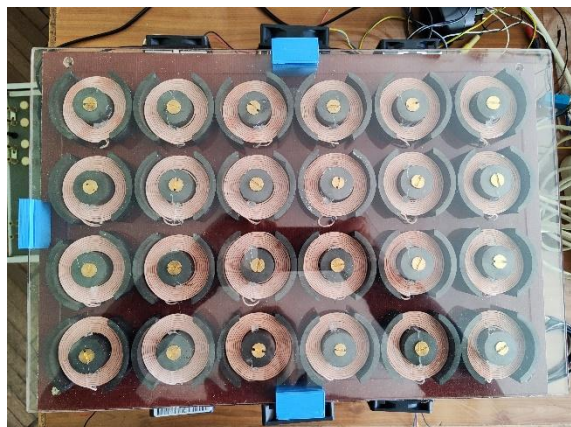
Другата концепция е да се създаде «гъвкава» повърхност за готвене [3], при която в зависимост от площта на дъното на съда, да се включват съответните индуктори, всеки свързан с отделен преобразувател работещи паралелно [4] или работещи като инвертори с многозвене

колебателен кръг, много близки до матричните преобразуватели [5]. Двете концепции имат предимства и недостатъци, но един от основните им недостатъци е да работят със съдове които са от неферомагнитен материал. Обикновено за да се нагряват такива съдове е необходима висока честота в диапазона 150 – 200 kHz за разлика от работната честота при феромагнитните съдове – 30-50 kHz.

Едно решение на този проблем е използването на нагряването в магнитна верига, което не се влияе толкова от стойността на магнитната проницаемост на материала на съда. Настоящото изследване е свързано с внедряването на многозвенните инвертори при индукционните котлони за нагряване в магнитна верига, които се отличават с работа при ZVS комутация за малки загуби и възможност за голям честотен диапазон, както и устойчива работа при различни товари. Управлението на тези инвертори е нетрадиционно и е свързано с възможност за промяна на различни параметри.

ИЗЛОЖЕНИЕ

Многозвения индуктор на индукционния котлон за нагряване в магнитна верига е показан на фиг.1. Състои се от 24 еднотипни R36 магнитопроводи с плоски намотки, подредени в 4 реда и 6 колони.



Фиг. 1. Многозвения индуктор за ИК за нагряване в магнитна верига.

От долната страна са разположени шини с възможност за свързване на отделните звена в различни комбинации, както

е показано на фиг.2.



Фиг. 2. Свързване по стълбове на многозвения индуктор за ИК.

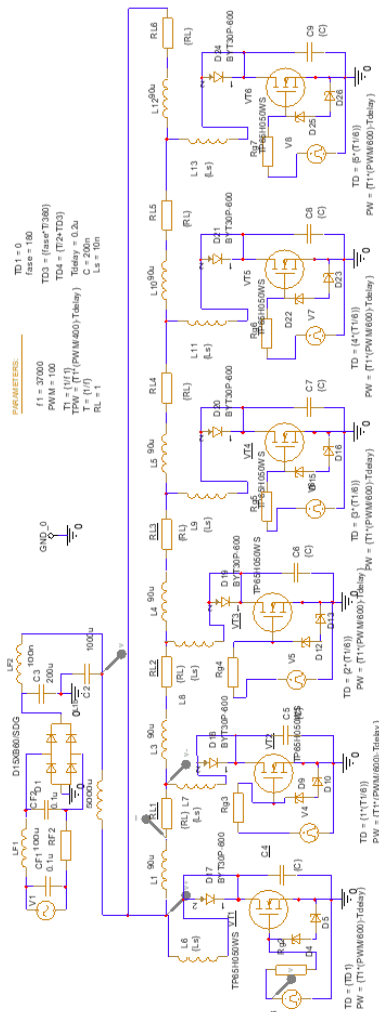
В [6] е описана комбинация от свързване по редове, при които се получава четиризвения инвертор. Обект на настоящото изследване е свързването по стълбове, при които се получава 6-звения конфигурация и от там 6-фазов многозвения инвертор (МИ), работещ в режим на комутация при нулево напрежение (ZVS) на използваните SiC MOSFET транзистори.



Фиг. 3. Транзисторен модул за свързване към всяко звено на многозвения индуктор.

На фиг.3 е показан транзисторния модул на всяко от 6-те звена на 6-фазния инвертор. Освен от SiC транзистора, прикрепен механично към радиатор за охлаждане имаме последователно свързан на него бърз диод, разположен на същия радиатор. За захранването на транзистора е използван специализиран драйвер с галванично разделено захранване. Предвидена е и токова защита с токов трансфор-

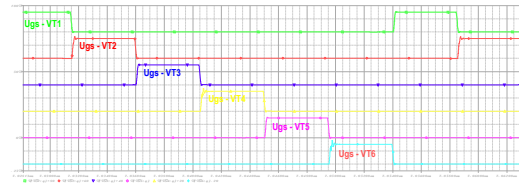
мотор на LEM за високи честоти. На платката е разположен и работния кондензатор на WIMA с работно напрежение от 1200V, паралелно свързан на транзистора. Работоспособността на схемата е проверена с извършено симулационно изследване с помощта на софтуера OrCAD P-Spice 22 версия. На фиг. 4 е показана симулационна схема на 6-фазния ZVS многозвенен инвертор.



Фиг. 4. Симулационна схема на 6-фазен ZVS многозвенен инвертор за индукционно нагряване.

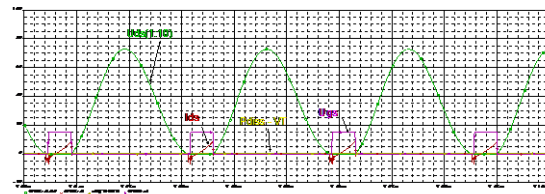
Основното предимство на схемата е възможността и за работа при асиметричен товар, отразено със стойността на съпротивлението на първото звено на индуктора R_{L1} на ИК.

На фиг. 5 са показани управляващите сигнали на транзисторите на отделните звена. Подават се импулсни напрежения с честота 37 kHz и с фазово отместване от 60° . Чрез регулиране на коефициента на запълване е възможно регулиране на изходната мощност, без да се нарушава условието за ZVS. На фиг.5 са дадени управляващите сигнали на 6-те транзистора с дефазиранието между тях.



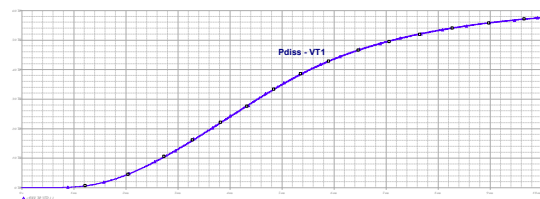
Фиг. 5. Управляващи сигнали на транзисторите в 6-фазен ZVS МИ за индукционно нагряване.

Работата на един от транзисторите при пълно натоварване е показана на следващата фиг.6.

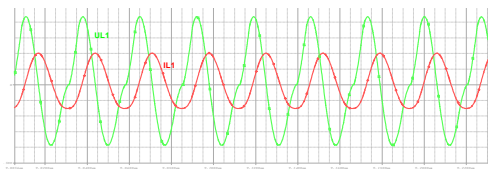


Фиг. 6. Напрежение U_{ds} , напрежение U_{ds} и ток I_d на транзистора VT1 в ZVS МИ.

Максималното напрежение на транзисторите U_{ds} е около 730V, а тока през транзистора I_d е около 10A. Вижда се ZVS комутацията при включване и изключване на транзистор. На това се дължи и ниските загуби в транзистора, които са от порядъка на 10W и са показани на фиг.7.



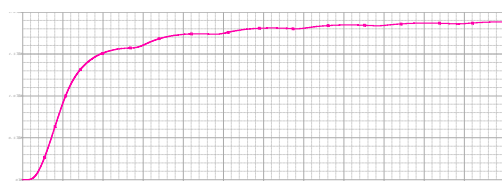
Фиг.7. Загуби в транзистора VT1 в ZVS МИ.



Фиг. 8. Напрежение и ток през една от секциите на многозвения индуктор.

Напрежението и тока на една от секциите на многозвения индуктор са показани на фиг. 8. Напрежението върху секцията е около 430V, а тока през индуктора е около 10A.

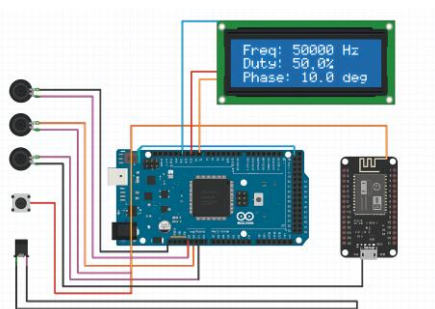
Изходната мощност при натоварен индуктор с товар – съд обхващащ всички секции е около 1900W. Това се вижда от симулационните резултати, показани на фиг.9.



Фиг. 9. Изходна мощност на натоварен многозвения индуктор в МИ.

За да се осъществи верификация на симулационните резултати с практически макет на ИК с 6-фазен ZVS МИ е необходимо подходяща управляваща схема, която да осигури управляващите импулси на транзисторите на отделните звена, както беше показано на фиг.5. Това може да се осъществи по два начина – чрез използване на микроконтролерно управление с подходящ софтуер или изцяло хардуерна реализация на основата на генераторна схема и обработващи цифрови схеми за да се постигне желаното дефазироване.

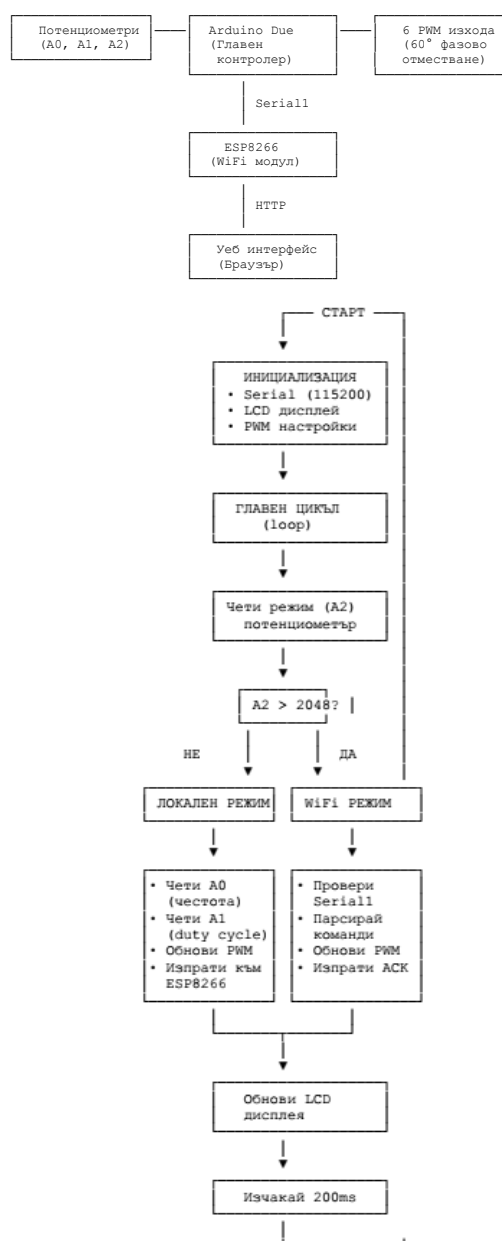
Първият вариант определено е по-добър, понеже дава гъвкавост при изследванията и възможност да се променят множество параметри без да се променя хардуерната реализация, а само с помощта на софтуера.



Фиг. 10. Схема на системата за управление на МИ за ИК.

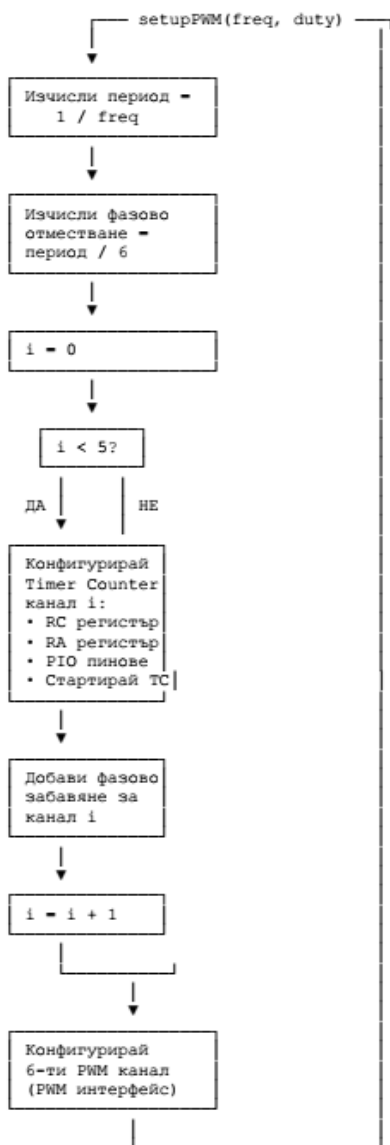
На фиг.10 е показана схемата на свързване на избрания едноплатков микроконтролер Arduino Due с 32bit Cortex M3 микроконтролер SAM3X на Atmel, свързан с външни потенциометри за настройка на честота, коефициента на запълване и фазовото отместване на управляващите импулси. Зададените стойности се изписват на 4 редов LCD дисплей с 20 символа на ред. Предвидена е и интернет свързаност чрез контролера ESP8266.

Блоковата схема на системата е показана на графиката по-долу. На нейна база е изграден алгоритъм на програмата за средата за разработка Arduino API, показан на фиг.11.



Фиг. 11. Главен алгоритъм.

Както се вижда параметрите се задават в локален режим – чрез потенциометрите или чрез WiFi режим чрез виртуални плъзгачи на интернет страницата, която се зарежда при връзка на смарт устройство или компютър към ssid:ESP32_PWM_Control.



Фиг. 12. Алгоритъм за PWM настройка (setupPWM).

Техническите детайли са:

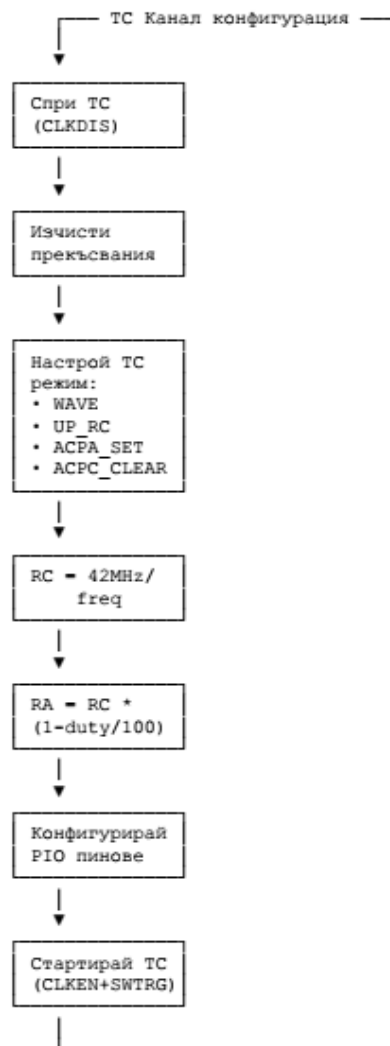
PWM честоти:

- Диапазон: 100 Hz - 200 kHz;
- Резолуция: 12-bit (4096 стъпки);
- Тактова честота: 42 MHz.

Фазово отместване: Фиксирано: 60° между съседни канали; Общо покритие:

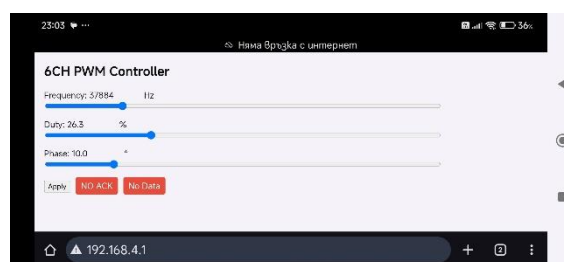
360° за всички 6 канала; Реализация: Времево забавяне при стартиране.

Хардуерни връзки: PWM изходи: D2, D3, D4, D5, D6, D7; LCD: RS=8, EN=9, D4-D7=10-13; Потенциометри: A0=честота, A1=duty, A2=режим; ESP8266: TX1(18), RX1(19), GND.

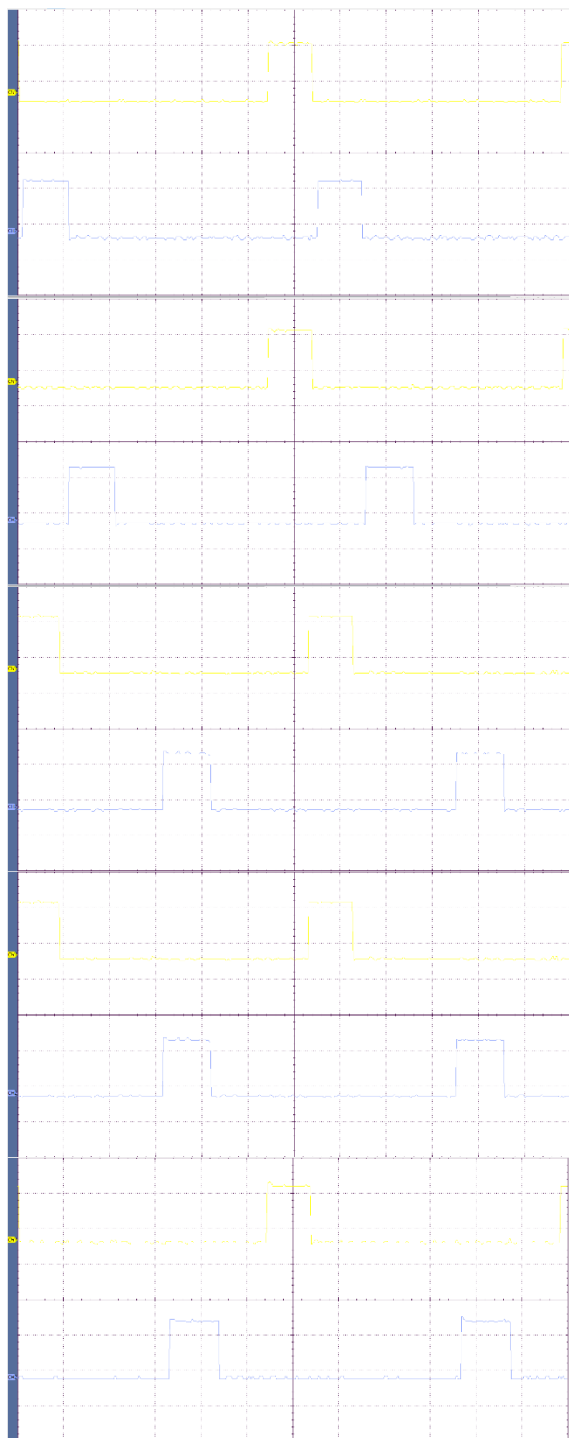


Фиг. 13. Timer Counter конфигурация за всеки PWM канал.

Менюто за управление на параметрите по wifi е дадено на екранната снимка по-долу.



На фиг. 14 са представени реални осцилограми на изходните сигнали на всяка от фазите спрямо първата. Вижда се че дефазирането е спазено и няма застъпване между отделните канали.



Фиг. 14. Осцилограми на на PWM изходи D2, D3, D4, D5, D6, D7 от Arduino Due.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В изследването е предложена система за управление на 6-фазен многозвнен инвертор въз основа на извършени симулационни изследвания. Предложен е алгоритъм за работа и е реализирана програма за цифрово управление на инвертора с помощта на Arduino Due. Представени са реални резултати от работата на системата за управление.

Благодарности: Това изследване е финансирано от Европейския фонд за регионално развитие по Оперативна програма „Научни изследвания, иновации и цифровизация за интелигентна трансформация 2021-2027“, проект CoS „Интелигентни ме-хатронни, екологични и енергоспестяващи системи и технологии“, BG16RFPR002-1.014-0005.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Dankov, D., Research on Inverter Circuits for Induction Cookers, Unitech'11 - Collection of Reports, November 18–19, 2011, Gabrovo, pp. I-241–I-246, ISSN 1313-230X (in Bulgarian).
- [2] H. N. Pham, H. Fujita, K. Ozaki and N. Uchida, "Dynamic Analysis and Control for Resonant Currents in a Zone-Control Induction Heating System," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 28, no. 3, pp. 1297-1307, March 2013, doi: 10.1109/TPEL.2012.2210286.
- [3] Ó. Lucía, J. Acero, C. Carretero, and J. M. Burdío, "Induction heating appliances: Toward more flexible cooking surfaces," IEEE Ind. Electron. Mag., vol. 7, no. 3, pp. 35–47, Sep. 2013.
- [4] Quoc Dung Phan, Anh Tuan Vo, Thang Pham Ngoc, Pascal Maussion. Improving multiphase induction-heating systems: several configurations and resonant control show promise. IEEE Industry Applications Magazine, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2018, 24 (2), pp.45 - doi:66.10.1109/MIAS.2017.2740452.
- [5] Sarnago, Hector & Guillén, Pablo & Lucia, Oscar. (2019). Multiple-Output ZVS Resonant Inverter Architecture for Flexible Induction Heating Appliances. IEEE Access. 7. 1-1. 10.1109/ACCESS.2019.2950346.
- [6] D. Dankov, P. Marinov, High-frequency induction heater with multi-link oscillating circuit, Collection of reports from the International Scientific Conference "UNITECH'24" – Gabrovo, ISSN 1313-230X (in Bulgarian).