

**LLC РЕЗОНАНСЕН ИНВЕРТОР ЗА ПРЕОБРАЗУВАНЕ НА ЕНЕРГИЯТА  
ПОЛУЧЕНА ОТ ФОТОВОЛТАИЧЕН ИЗТОЧНИК****Димитър Спиров***Университет по хранителни технологии - Пловдив***LLC RESONANT INVERTER FOR TRANSFORMATION OF ENERGY  
RECEIVED BY PHOTOVOLTAIC SOURCE****Dimitar Spirov***University of Food Technologies – Plovdiv***Abstract**

*Power electronic equipment for transformation of energy received by photovoltaic source is developed. The operation of the load LLC resonant converter is examined in the different modes. Oscillograms of the load voltage were obtained by direct connection, straightening with bridge rectifier and smoothing the voltage pulsations with a capacitive filter. The use of a rectifier and capacitive filter results in peaks in the resonant current curve.*

**Keywords:** LLC resonant converter, photovoltaic source.

**ВЪВЕДЕНИЕ**

Една от основните технологии, които се използват за оползотворяване на слънчева енергия е фотоволтаичното преобразуване. Фотоволтаичните елементи използват фотоволтаичният ефект, при който се извършва директно преобразуване на слънчева енергия в електрическа енергия. Енергийните характеристики на слънцето като енергиен източник за Земята са ниска плътност на топлинния поток; неравномерна спектрална плътност на излъчването; нестационарна интензивност през различните часове на деня, зависещи от метеорологичните условия на местността и др. Тези особености налагат специфични технически решения и средства за оползотворяване на слънчевата енергия [1, 2, 3].

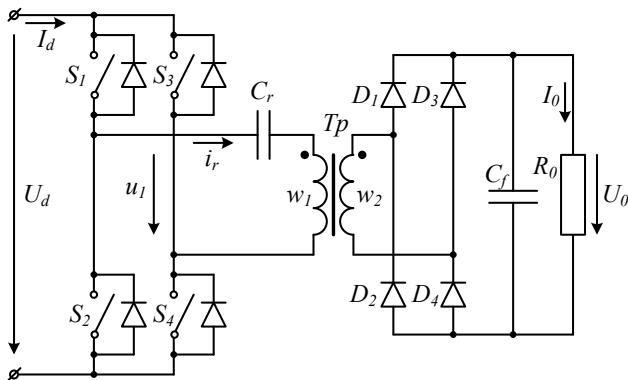
Инверторите, използвани за преобразуване на енергията на фотоволтаичните източници трябва да удовлетворяват широк набор от условия, които водят до повишаване на работоспособността и ефективността и намаляване на себестойността на уредбата. За решаването на този проблем в редица литературни източници са използвани резонансни преобразуватели [3].

Характерна особеност на резонансните преобразуватели е използването на резонансни процеси при превключването на силовите прибори. В зависимост от типа на използваната конфигурация на силовата схема може да се осъществи превключване при нулево напрежение или нулев ток. Това позволява да се намалят комутационните загуби и използването на резонансни преобразуватели при високи честоти. Типът на силови прибори определя възможността за реализация на различни режими на работа при резонансните преобразуватели. Резонансният процес се проявява при превключването на силовите прибори, при което постоянното захранващо напрежение се явява приложено обикновено към последователен резонансен кръг, поради което токът през силовите прибори и товара има близка до синусоидалната форма. Това намалява електромагнитните излъчвания и дава по-добра електромагнитна съвместимост.

Целта на настоящия доклад е разработване на LLC резонансен инвертор за преобразуване на енергията получена от фотоволтаичен източник. Необходимо е да се изследват различните режими на работа на преобразувателя.

## ИЗЛОЖЕНИЕ

Принципната схема на LLC резонансен инвертор е представена на фиг.1 [1].



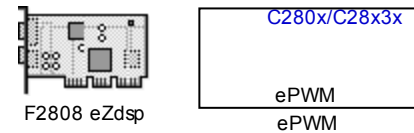
Фиг. 1. Принципна схема на LLC резонансен инвертор

Схемата съдържа мостов инвертор  $S_1 \div S_4$ , резонансен кондензатор  $C_r$ , трансформатор  $T_p$ , нерегулируем изправител  $D_1 \div D_4$  с capacitивен филтър  $C_f$  и товар  $R_0$ .

Напрежението на входа на резонансната верига  $u_1(t)$  се осигурява от мостовия инвертор под формата на правоъгълни импулси с честота  $f_{sw}$ . Правоъгълните импулси предизвикват резонансен процес, при който протича синусоидален ток, който се преобразува от трансформатора, изправя от изправителя и подава на товара  $R_0$ .

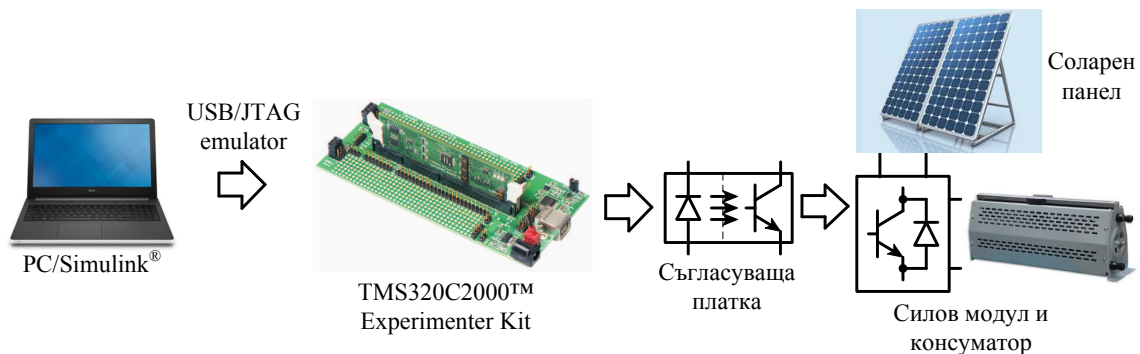
Импулсите за управление на силовите ключове се получават от управляващата платка „TMS320C2000™ Experimenter Kit“. Платката „TMS320C2000™ Experimenter Kit“ изпълнява функциите както на управляваща, така и на изчислителна платформа. Тази платка е изградена на базата на цифровия сигнален процесор (ЦСП) TMS320F2808, съвместим с Simulink®, и включва шест

двойки ШИМ канала (общо 12 канала), 16 аналого-цифрови преобразувателя (АЦП) и вход за енкодер за скорост. Процесора е 32-битов ЦСП с аритметика с фиксирана запетая, следователно могат да бъдат използвани блокове от Simulink® с дискретна математика и математика с фиксирана запетая.



Фиг. 2. Блок-схема на системата за управление

На базата на анализа на работата на схемата [1] е разработена система за управление. Модулите за формиране на управляващите сигнали са разработени с елементи от библиотеката “Target for TI C2000” в MATLAB/SIMULINK и са компилирани в „TMS320C2000™ Experimenter Kit“ чрез USB/JTAG емулятора, вграден в платката „TMS320C2000™ Experimenter Kit“. Блоквата схема на модула, зареден в паметта на ЦСП за многократно изпълнение, е дадена на фиг. 2. Използвания от библиотеката “Target for TI C2000” блок за ШИМ (ePWM) формира пакети правоъгълни импулси със зададена честота до 1MHz и фазово закъснение, което може да бъде избрано като брой точки за работен цикъл. Импулсите от блоковете за ШИМ се получават на предварително конфигурираните GPIO входове и изходи на платката. За галваничното разделяне на управляващата платка и силовия блок се използва съгласуваща платка. Блоквата схема на разработената система е дадена на фиг. 3.



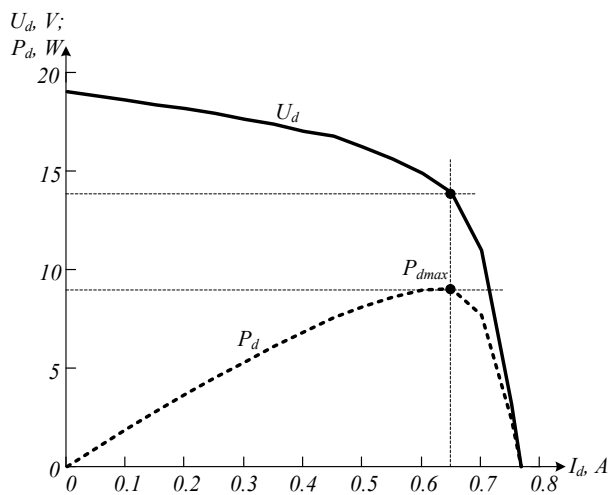
Фиг. 3. Блок-схема на разработената система

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ РЕЗУЛТАТИ

Разработената DSP базирана система за управление на LLC резонансен инвертор за преобразуване на енергията получена от фотоволтаичен източник е изследвана експериментално със соларен модул тип V-M15-36 с номинални данни  $P_n = 15W$ ;  $U_n = 17,5V$ ;  $I_n = 0,857A$ , захранващ консуматор със съпротивление  $R_0 = 80\Omega$ .

На база на изчислителната методика, дадена в [1], са избрани параметрите на елементите: коефициент на трансформация на трансформатора  $k_T = 2$ ; индуктивност от самоиндукция на първичната намотка  $L_{\sigma 1}$  и на вторичната намотка, приведена към първичната  $L'_{\sigma 2}$ :  $L_{\sigma 1} = L'_{\sigma 2} = 7,188\mu H$ ; взаимна индуктивност  $L_m = 1,732mH$ ; капацитет на резонансния кондензатор  $C_r = 470nF$ . Честотата на управляващите импулси  $f_{sw}$  е  $5,6kHz$ .

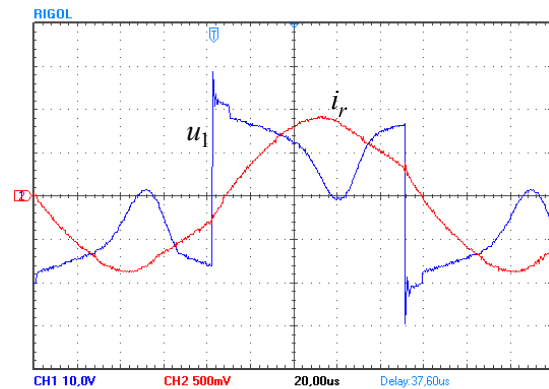
На фиг. 4 са представени експериментално снетите зависимости на напрежението и мощността на соларния панел във функция от тока при изменение на съпротивлението на товара от празен ход до късо съединение. От фигурата се вижда, че при ток  $I_d = 0,65A$  се получава напрежение  $U_d = 13,87V$ , а мощността има максимална стойност:  $P_{dmax} = 9,02W$ .



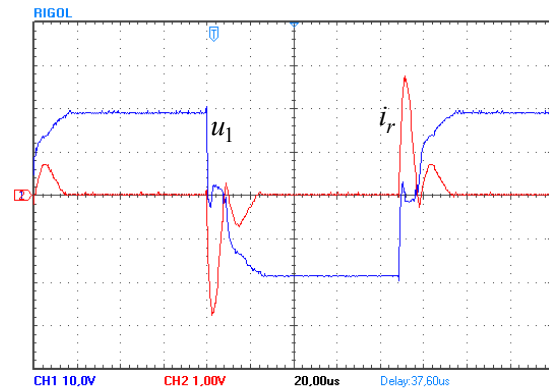
Фиг. 4. Зависимости на  $U_d$ ,  $P_d = f(I_d)$

На фиг. 5 – фиг. 7 са представени зависимости на напрежението на входа на резонансната верига  $u_1$  и резонансният ток  $i_r$  при работа на резонансния LLC преобразувател в режим на празен ход, режим на късо съединение и при натоварване. При измерване-

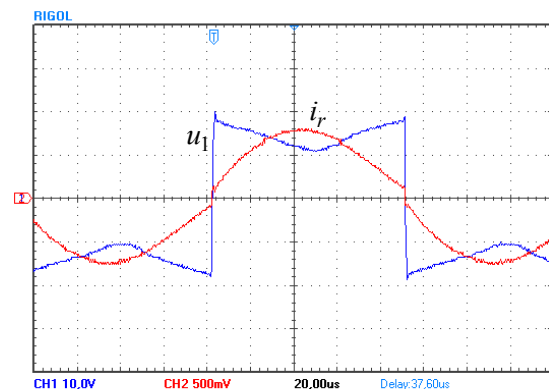
то на тока е използван токова сонда с коефициент  $1V/A$ .



Фиг. 5. Зависимости на  $u_1$  и  $i_r = (t)$  при празен ход



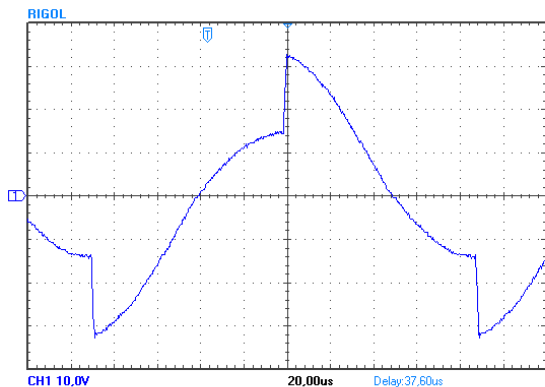
Фиг. 6. Зависимости на  $u_1$  и  $i_r = (t)$  при късо съединение



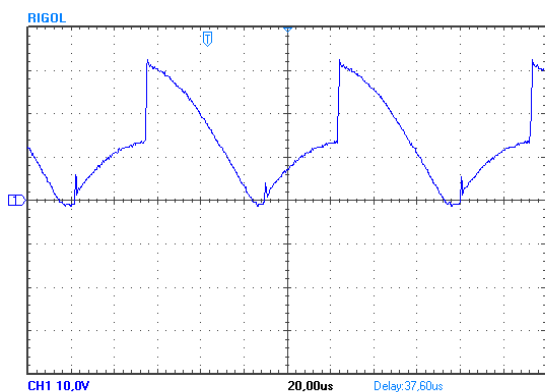
Фиг. 7. Зависимости на  $u_1$  и  $i_r = (t)$  при натоварване

От горните фигури се вижда, че и при трите изследвани режима с нарастване на резонансният ток  $i_r$ , напрежението  $u_1$  на входа на преобразувателя спада, като при празен ход при достигането на максимума на  $i_r$ , входното напрежение спада до нула.

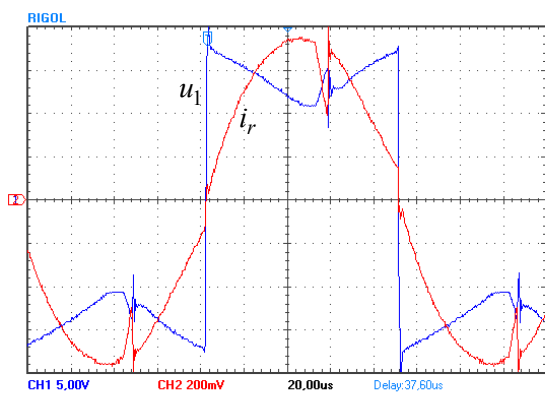
На фиг. 8 и фиг. 9 са дадени графиките на изходното напрежение  $u_0$  при липса на изправител и изглаждащ филтър и при използването на мостов изправител на изхода на схемата, а на фиг. 10 са дадени графиките на  $u_1$  и  $i_r$  за този режим.



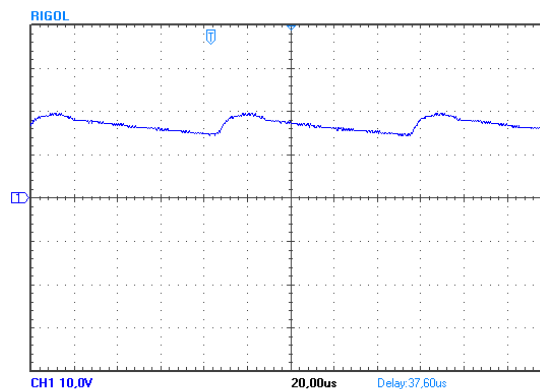
Фиг. 8. Зависимост на  $u_0 = f(t)$  при натоварване



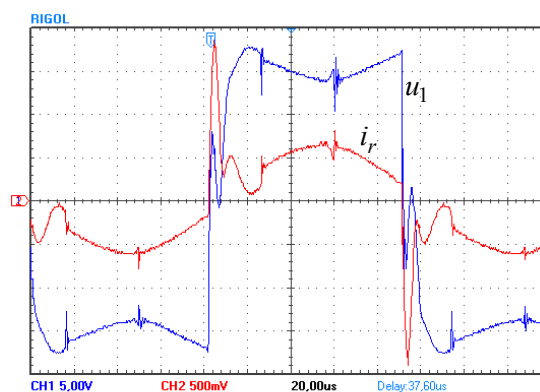
Фиг. 9. Зависимост на  $u_0 = f(t)$  с изправител



Фиг. 10. Зависимости на  $u_1$  и  $i_r = f(t)$  с изправител



Фиг. 11. Зависимост на  $u_0 = f(t)$  с изправител и филтър



Фиг. 12. Зависимости на  $u_1$  и  $i_r = f(t)$  с изправител и филтър

Осцилограмите на  $u_0$ ,  $u_1$  и  $i_r$  при използване на кондензаторен филтър  $C_f = 0,4\mu\text{F}$  са дадени на фиг. 11 и фиг. 12.

От горните фигури се вижда, че изправянето на изходното напрежение и изглаждането на пулсациите е свързано с влошаване на формата на резонансния ток  $i_r$ . От фиг. 12 може да се отчете, че пиковите стойности на тока  $i_r$  достигат 1,85А или са 2,43 пъти по-големи от максимума на синусоидата на резонансния ток.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В доклада е разработен LLC резонансен инвертор за преобразуване на енергията получена от фотоволтаичен източник. Изследвана е работата на преобразувателя в различните режими – празен ход, късо съединение и работа под товар. Получени са осцилогра-

ми на напрежението върху товара при директното му свързване, при изправянето с мостов изправител и изглаждане на пулсациите на напрежението с капацитивен филтър.

## REFERENCE

- [1] L. Shivaraja. Modeling and Simulation of LLC Resonant Converter for Photovoltaic Systems. International Journal of Emerging Technology and Innovative Engineering, Vol. 1, Issue 4, pp. 175-179, 2015.
- [2] I. Batarseh. Resonant Converter Topologies with Three and Four Energy Storage Elements, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 9, No. 1, pp. 64-73, 1994.
- [3] S. Sridhar, V. Naik. A ZVS Based Boost Resonant Converter for PV Applications. International Electrical Engineering Journal, Vol. 7, No. 4, pp. 2212-2222, 2016.