

## ЕНЕРГЕТИЧНИ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА МНОГОПОСТОВ ИНВЕРТОРЕН ЗАВАРЪЧЕН ИЗТОЧНИК

Димитър Юдов, Даниела Марева  
Бургаски свободен университет

## ENERGY CHARACTERISTICS IN MULTIPLE INVERTER WELDING SOURCE

Dimitar Yudov, Daniela Mareva  
Burgas Free University  
e-mail: d\_mareva@abv.bg

**Абстракт:** *Инверторните източници за заваряване изместват конвенционалните, поради убедителните предимства - малки габарити и тегло, лесно запалване и високо качество на дъгата, високоенергийни и икономически показатели, работа при всякакви условия.*

*Бързото развитие и внедряване на инверторните токоизточници за заваряване стана възможно след разработването на подходящи силови транзистори (IGBT). Многопостовите източници на заваряване са с по-голяма мощност в сравнение с обикновените източници за заваряване. Това поставя по-високи изисквания към техните енергетични характеристики, което налага много прецизно проектиране и избор на елементната база .*

*Целта на настоящата статия е да се изследват енергетичните показатели на многопостов инверторен източник на заваряване, свързани с комутационните загуби при различен заваръчен ток.*

**Ключови думи:** *многопостовите заваръчни агрегати, енергетични характеристики, регулатори на ток.*

**Abstract:** *Inverter welding sources are replacing conventional sources due to their convincing advantages - small size and weight, easy ignition and high quality of the arc, high energy and economic performance, operation in all conditions.*

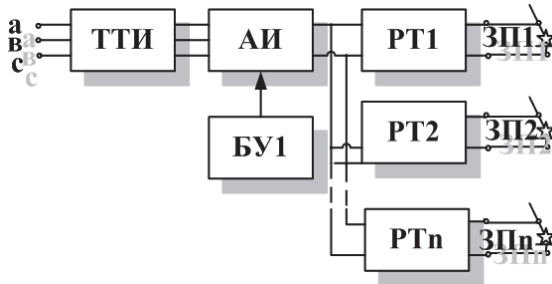
*The rapid development and implementation of transistor welding inverters became possible after the development of suitable power transistors (IGBT).*

*Multi-station welding sources have more power than conventional welding sources. This places higher demands on their energy performance, which requires very precise design and selection of the element base.*

*The purpose of this article is to study the energy performance of a multi-station inverter-welding source associated with switching losses at different welding currents.*

**Keywords:** *control, Inverter supply, pulse arc welding, multi-station welding units.*

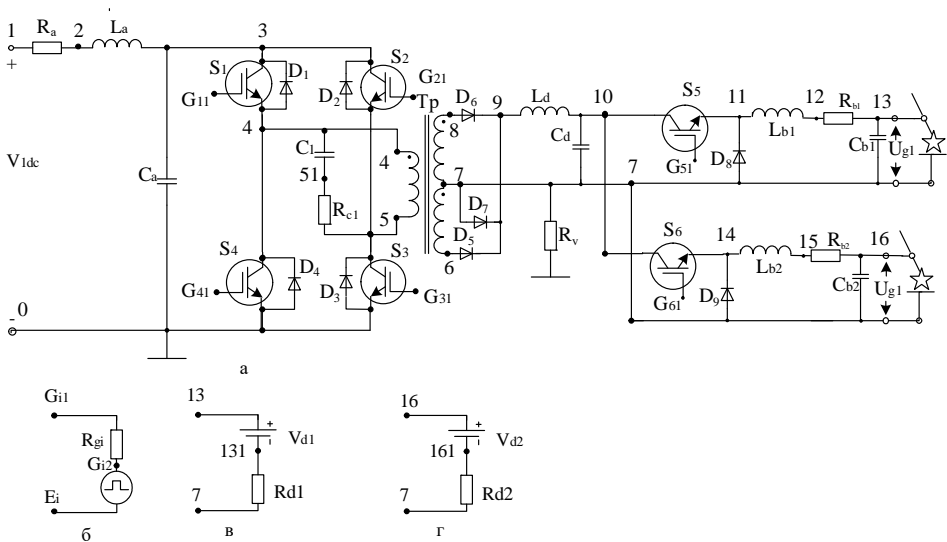
Блоквата схема на многопостов инверторен токоизточник е (фиг.1):



Фиг. 1. Блокова схема на многопостов инверторен заваръчен източник

Блоквата схема се състои от: входен трифазен токоизправителен блок (AC/DC), обикновено реализиран по схема „Ларионов“; автономен инвертор на напрежение (АИ) с изходен еднофазен токоизправителен блок, обикновено със средна точка (DC/AC/DC), изглаждащ филтър: РТ – транзисторен регулатор на ток (DC/DC) и заваръчен пост (ЗП)

Изследванията се реализират с компютърна симулация. PSpice. Моделът на двупостов инверторен токоизточник за заваряване има вида:



Фиг. 2. Принципна схема на двупостов инверторен източник за заваряване (а), схема на включване на управляващия генератор на импулси (б), еквивалентна схема на дъгата в ЗП1 (в) и ЗП2 (г).

На фиг. 2.а е показан PSpice моделът на силовия блок на двупостов инверторен източник за заваряване, реализиран по блоквата схема от фиг.1. На фиг. 2.б е показано включването на управляващия генератор на импулси. От едната страна генераторът, чрез вътрешното си съпротивление се включва към гейта на съответния транзистор,

като  $i=1, 2, 3, 4, 5, 6$ . От другата страна генераторът се включва към емитера на съответния IGBT транзистор. Например за транзистор  $S_2$  цифрата  $i=5$ . На фиг. 2.в,г са дадени еквивалентните заместващи схеми на дъгата в двата заваръчни поста.

В единият диагонал на мостовия автономен инвертор е включен хранващият източник, състоящ се от директно свързан към мрежата трифазен токоизправител. В другия диагонал е включен изходният трансформатор. Към изходния трансформатор са свързани токоизправител ( $D_5, D_6$ ), обратен диод ( $D_7$ ), филтър ( $L_d, C_d$ ).

Последователно на хранващия източник е включена малка бобина ( $L_a$ ), която заедно с включения малък кондензатор ( $C_a$ ), намаляват комутационните загуби в силовите транзистори на моста.

В изследваната схема регулаторите на ток (PT) са 2 на брой и всеки поотделно може да регулира стойността на заваръчния ток от 20A до 250A. Регулаторът на ток се реализира като понижавач прав транзисторен преобразувател.

Изследването на показаната схема се реализира чрез PSPICE модел на еквивалентната заместваща схема на инверторния източник за заваряване (фиг. 2), като допълнително в PSPICE модела се отчитат активните загуби в реактивните елементи. Стойностите на гравивните елементи в PSPICE модела са:

За инвертора:  $V_{1dc} = 500V, L_a = 15\mu H, C_a = 20\mu F, L_d = 15\mu H, C_d = 100\mu F$

Трансформаторът се симулира, чрез магнитно свързани бобини:  $L_1 = 50\mu H, L_2 = 1,8\mu H, L_3 = 1,8\mu H$  и коефициент на връзка между бобините ( $k_{123} = L_1 L_2 L_3$ ) = 0.97

За регулатора на ток:  $L_{b1} = 15\mu H, C_{b1} = 100\mu F, R_{b1} = 0.02, V_{d1} = 19V$ . Заваръчната дъга е заменена с еквивалентно съпротивление ( $R_{d1} = 0.04$ ) и противо е.д.н. ( $V_{d1} = 19V$ ). Тази еквивалентна замяна следва от зависимостта на напрежението на дъгата ( $U_g$ ) от тока на дъгата ( $I_d$ ):

$$U_g = 19 + 0,04 \cdot I_d$$

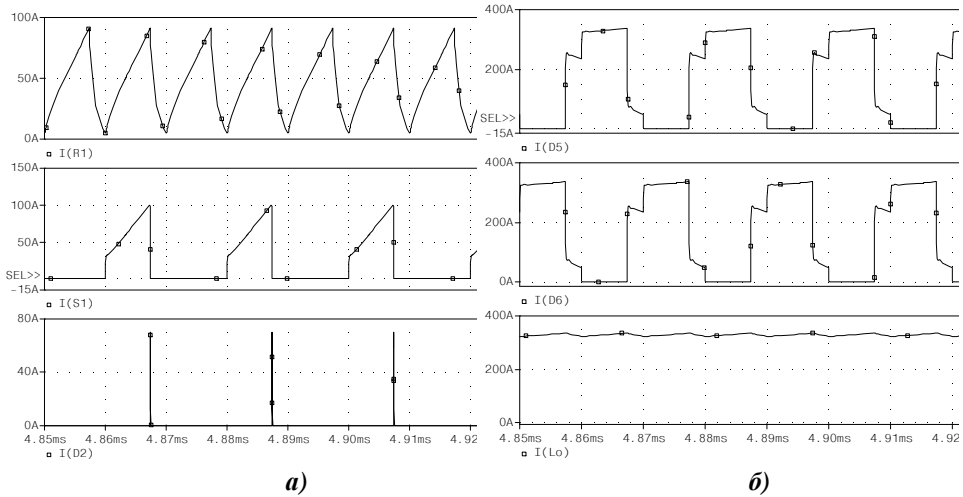
Аналогично за вторият заваръчен пост е прието  $R_{d2} = 0.04\Omega$  и  $V_{d2} = 19V$

Резисторът  $R_{d2}$  отразява еквивалентното съпротивление на заваръчния ток. В разглеждания пример  $R_{d1} = 0.04\Omega, R_{d2} = 0.04$ .

Избраният режим за изследване е при максимален заваръчен ток на всички постове при едновременно заваряване, както и при изменение на заваръчния ток в широки граници.

На следващите фигури са показани времедиаграми, които потвърждават работоспособността на изследвания модел.

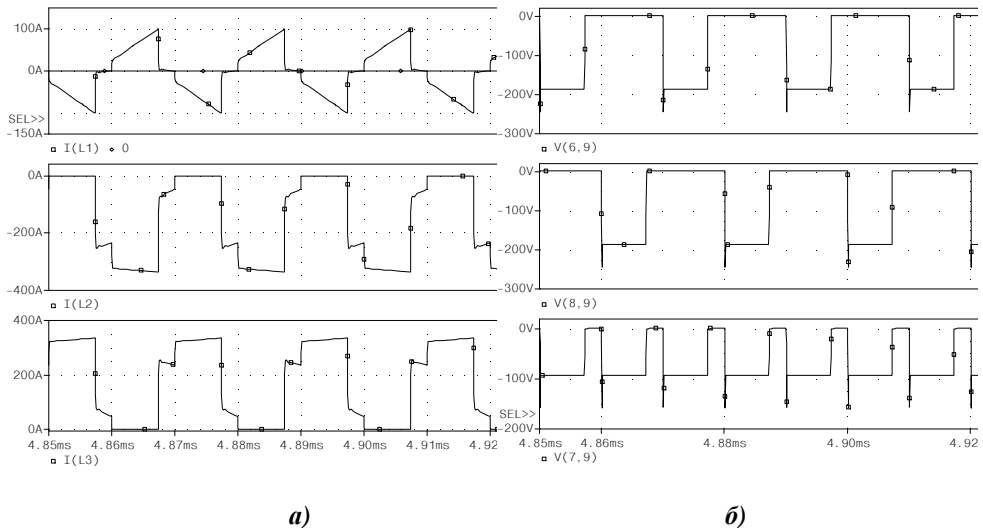
На фиг. 4 са дадени времедиаграми, показващи токовете натоварвания на елементите на схемата. Входният ток  $I(R_1)$ , токът през първия транзистор  $I(S_1)$ , токът през втория диод  $I(D_2)$  са показани на фиг.3.а. Токовете през изправителните диоди  $I(D_5), I(D_6)$  и токът в изхода на инвертора  $I(L_d) = I(L_o)$  са показани на фиг.3.б.



Фиг. 3. Токови натоварвания на елементите на схемата

Формата на токовете през изправителните диоди е близка до правоъгълна, но се вижда области на взаимна комутация, което влошава енергетичните показатели на схемата.

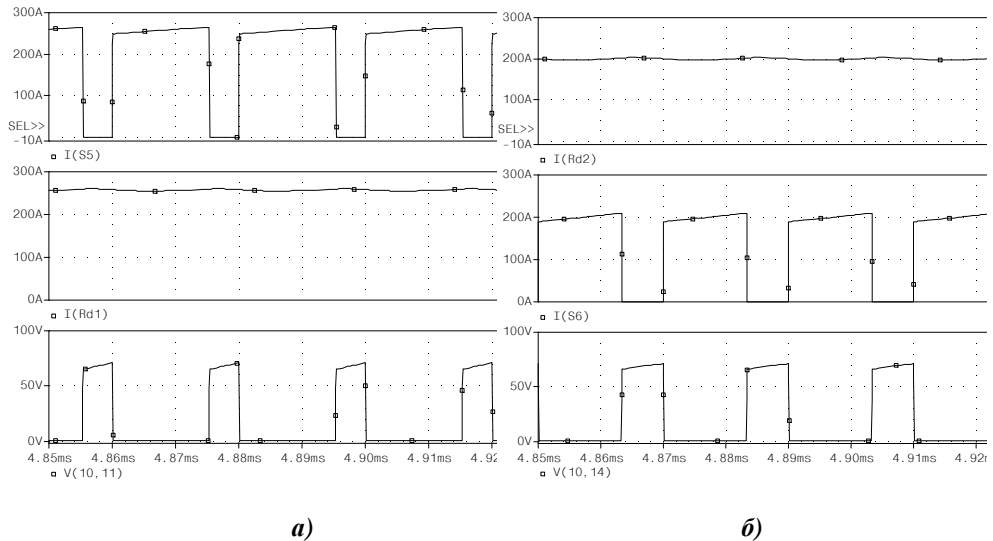
На фиг. 4.а са дадени токовете в трансформатора  $I(L_1)$ ,  $I(L_2)$ ,  $I(L_3)$ , а на фиг. 4.б са показани напреженията на изправителните диоди –  $V(6,9)$ ,  $V(8,9)$  и  $V(7,9)$ .



Фиг. 4. Токове в трансформатора  $I(L_1)$   $I(L_2)$   $I(L_3)$  и напрежението върху диодите –  $V(6,9)$ ,  $V(8,9)$  и  $V(7,9)$

От направените изследвания се констатира, че напреженията на силовите транзистори не превишават стойността на захранващото напрежение.

На фиг. 5 са показани основни времедиаграми за работата на двата регулатора на заваръчен ток.



**Фиг. 5. Заваръчният ток  $I(R_{d1})$ ,  $I(R_{d2})$ , токът през транзистора  $I(S_5)$ ,  $I(S_6)$ , напрежението на транзисторите  $V(10,11)$ ,  $V(10,14)$**

От изследването на двата регулатора на ток се вижда, че напрежението върху транзисторите е без пикови претоварвания и по стойност е по-малко от 100V. В разглеждания момент първият регулатор заварява с ток  $I(R_{d1})=250\text{A}$ , а втория с  $I(R_{d2})=200\text{A}$ .

Дадените времедиаграми показват нормална работа на транзисторен инвертор на напрежение. Напрежението върху запушените транзистори е равно на стойността на захранващото напрежение, което означава наличие на много добър коефициент на използване на транзисторите по напрежение.

Следващите изследвания показват енергетичните характеристики на мостовия автономен инвертор в различни режими на работа, което съответства при заваряване с различен заваръчен ток.

Многопостовите източници за заваряване в зависимост от метода на регулиране на заваръчния ток имат 3 режима на работа:

а) централизирано управление – променя се широчината на управляващия импулс на инвертора  $t_{ui}\text{-var.}$ , а управляващите импулси на заваръчните регулатори не се променят –  $t_{ur1}, t_{ur2} = \text{const.}$

б) децентрализирано управление – не се променя се широчината на управляващия импулс на инвертора  $t_{ui}\text{-const.}$ , а управляващите импулси на заваръчните регулатори се променят –  $t_{ur1}, t_{ur2} = \text{var.}$

в) смесено – променя се широчината на управляващия импулс на инвертора  $t_{ui}\text{-var.}$  и на заваръчните регулатори –  $t_{ur1}, t_{ur2} = \text{var.}$

Първото изследване е извършено при централизирано управление. Централизираното управление се използва при роботизирани комплекси – заваряване на статори на електрически двигатели, газопроводни тръби и др.

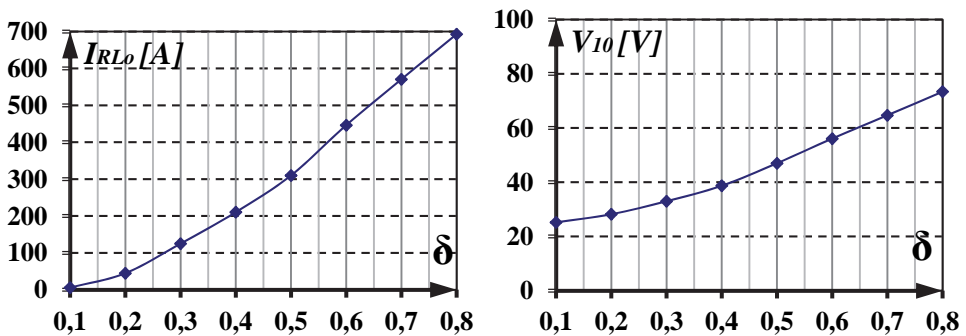


Изследванията се извършват при регулиране за заваръчния ток в инвертора, като се променят управляващите импулси на транзисторите I(S<sub>1</sub>), I(S<sub>2</sub>), I(S<sub>3</sub>), I(S<sub>4</sub>) - t<sub>ui</sub>=1μ, 2μ, 4μ, 6μ, 7μ, 8μ и импулси на заваръчните регулатори - tr<sub>1</sub>=15μ tr<sub>2</sub>=13μ.

Коефициентът на модулация за двукатния преобразувател (инвертор ) е δ<sub>i</sub>=2t<sub>u</sub>/T, а за регулаторите на ток е δ<sub>r</sub>=t<sub>u</sub>/T. В случая δ<sub>i</sub>=0,1; 0,2; 0,4 ;0,6 ; 0,8, а за δ<sub>r1</sub>=0,75 и δ<sub>r2</sub>=0,65

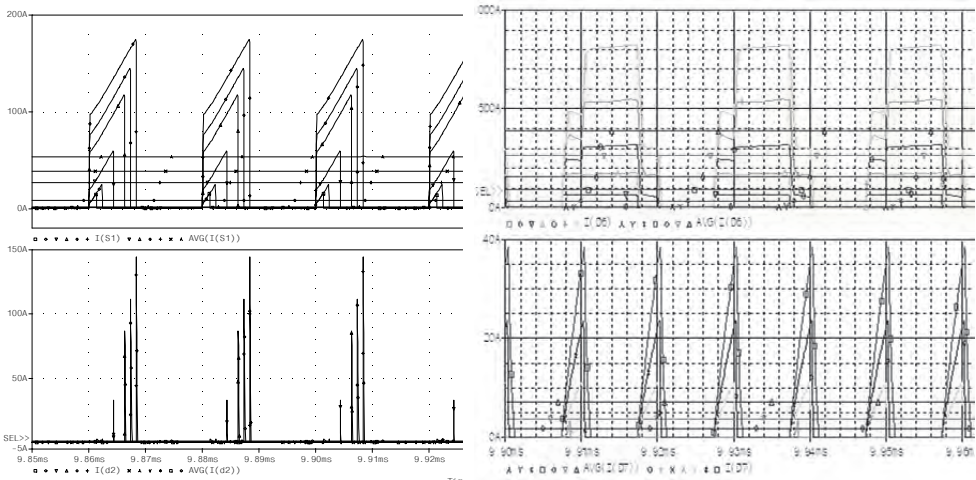
На фиг. 6 са показани измененията на изходното напрежение V(10) и регулирането на изходния ток I(R<sub>L0</sub>).

δ		0,1	0,2	0,4	0,6	0,7	0,8
<b>I<sub>RL0</sub></b>	<b>A</b>	5,7	44,9	196,3	446,2	570,7	693,1
<b>U<sub>10arc</sub></b>	<b>V</b>	25,2	28,2	38,7	56,1	64,7	73,4



Фиг. 6. Изходния ток ( $I_{RL0}$ ) и изходното напрежение ( $V_{10}$ )

На фиг. 7 са показани времедиаграми на токовете натоварвания на активните елементи.

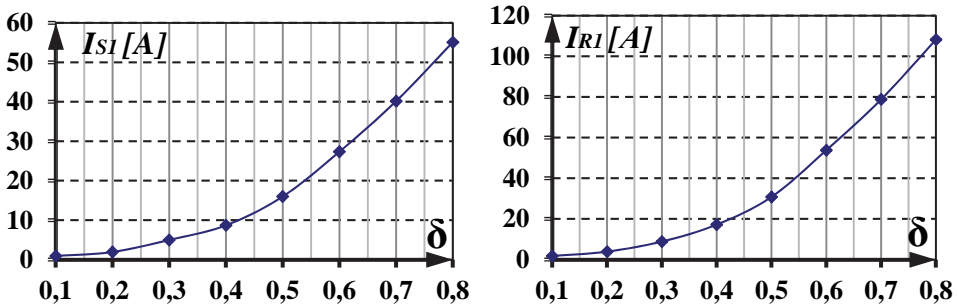


Фиг. 7. Времедиаграми на токовете натоварвания на активните елементи –  $I_{S1}, I_{D2}, I_{D6}, I_{D7}$

На следващите графики са дадени зависимостите на токовете натоварвания в зависимост от коефициента на модулация на инвертора.

Токовото натоварване на транзисторите и входния ток при различен заваръчен ток е: фиг.7.а.

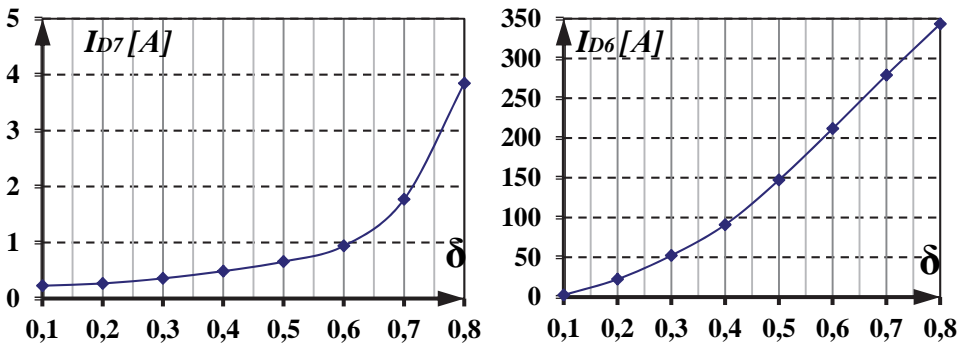
$\delta$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
$I_{SI}$ A	0,94	1,94	5,1	8,7	16,2	27,36	40,19	55,13
$I_{RI}$ A	1,78	3,96	8,9	17,23	30,87	53,84	78,85	108,24



Фиг. 7.а. Токът през транзисторите ( $I_{SI}$ ) и входния ток ( $I_{RI}$ )

Токово натоварване на изправителните диоди  $D_6=D_8$  и обратния диод  $D_7$  фиг.7.б.

$\delta$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
$I_{D7}$ A	0,23	0,27	0,36	0,49	0,66	0,94	1,773	3,848
$I_{D6}$ A	2,62	22,49	52,3	90,96	147,2	211,9	279,1	343,6



Фиг. 7.б. Токът през изправителния диод ( $I_{D6}$ ) и ( $I_{D7}$ )

Токът в обратния диод на инвертора има импулсен характер и много малки средни стойности, което означава, че инверторът на напрежение работи с висок  $\cos\varphi$ . Изправителните диоди са с голям ток, който съответства на сумата от заваръчните токове на отделните заваръчни постове.



Входна и изходна мощност на инвертора и к.п.д.

При централизирано управление  $\delta = \delta_i = \frac{2 \cdot t_u}{T}$ ,

При децентрализирано управление  $\delta = \delta_r = \frac{t_u}{T}$ ,

За инвертора входната и изходната мощности се определят от зависимостите:

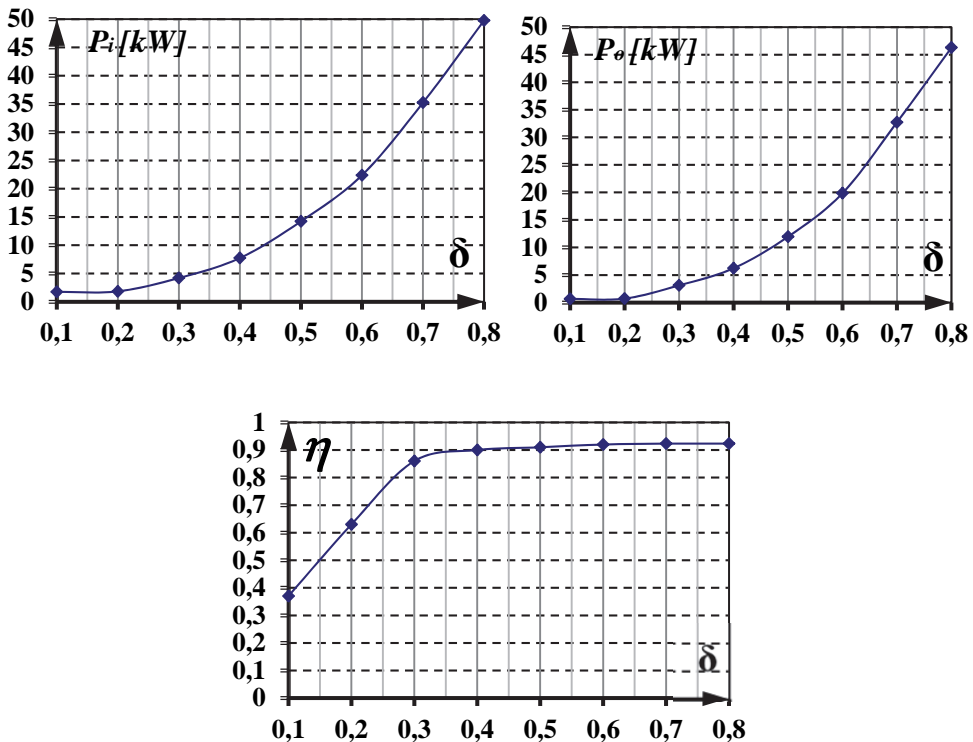
$$P_i = P_{ii} = \text{avg}(V_1 \cdot I_{R1}), P_o = P_{oi} = \text{avg}(V_{10} \cdot I_{RLo}).$$

За за регулаторите на ток (РТ) входната и изходната мощности се определят от зависимостите:

$$P_{ir1} = \text{avg}(V_{10} \cdot I_{S5}), P_o = P_{or1} = \text{avg}(V_{13} \cdot I_{Rd1}).$$

$$P_{ir2} = \text{avg}(V_{10} \cdot I_{S6}), P_o = P_{or2} = \text{avg}(V_{16} \cdot I_{Rd2}).$$

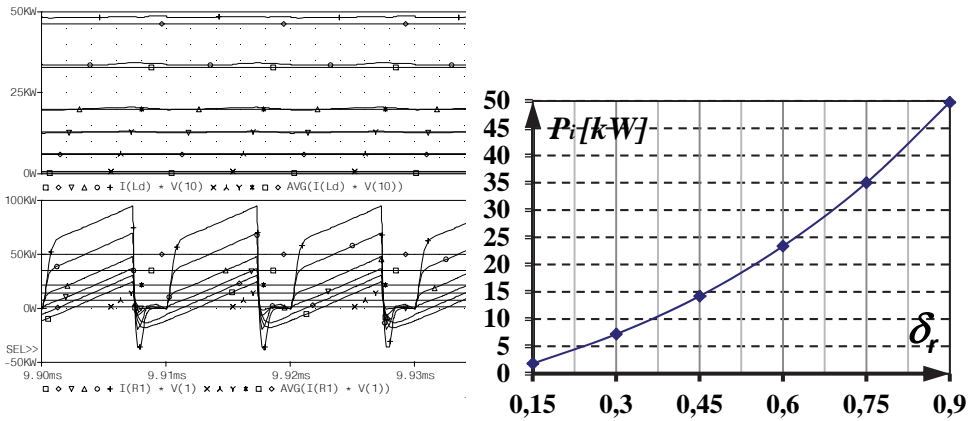
$\delta$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
$P_i$ kW	1,75	1,84	4,2	7,74	14,22	22,39	35,23	49,76
$P_o$ kW	0,65	0,72	3,12	6,23	11,96	19,86	32,74	46,29
$\eta$	0,37	0,63	0,86	0,9	0,91	0,92	0,923	0,923



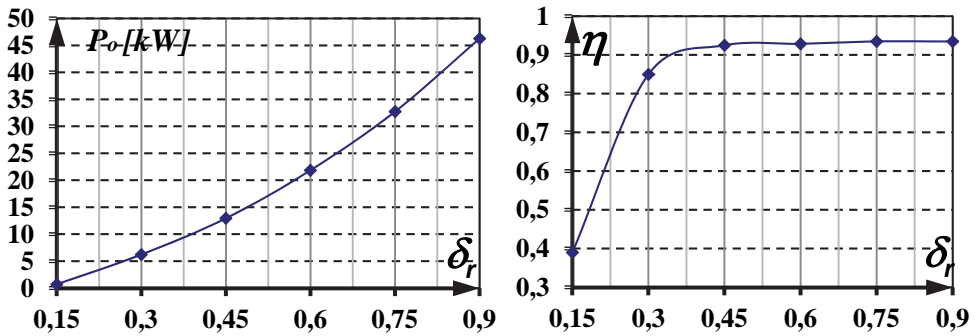
Фиг. 8. Входна, изходна мощност на инвертора и к.п.д.

При децентрализирано управление изследванията се извършват при регулиране за заваръчния ток в заваръчните регулатори, където  $tr_1 = tr_2 = 3u; 6u; 9u; 12u; 15u; 18u$ , а управляващите импулси на транзистори  $S_1, S_2, S_3, S_4$  не се променят -  $t_{ui} = 7u$ .

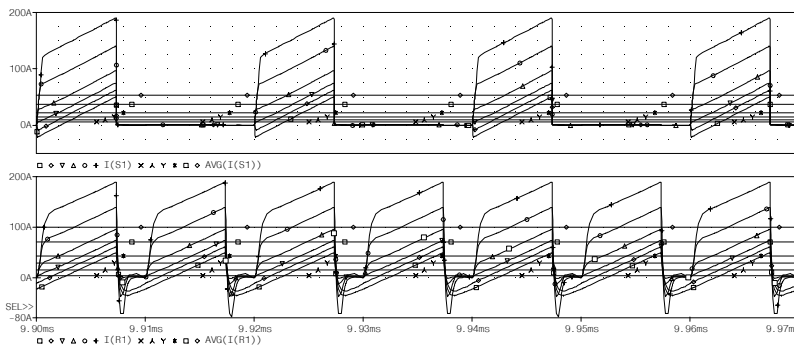
Коефициентът на модулация на заваръчните регулатори е  $\delta_r = t_u/T$  и  $\delta_i = 0,15; 0,3; 0,45; 0,6; 0,75; 0,9$  за  $\delta_i = 0,7$ .



$\delta$	0,15	0,3	0,45	0,6	0,75	0,9
$P_i$ kW	1,84	7,24	14,22	23,39	35,01	49,76
$P_o$ kW	0,718	6,23	12,96	21,86	32,74	46,29
$\eta$	0,39	0,86	0,911	0,935	0,935	0,935



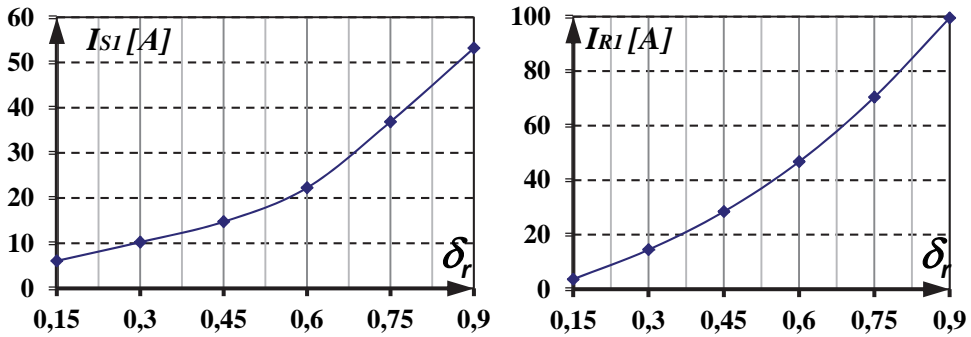
Фиг. 9. Входна, изходна мощност на инвертора и к.п.д.



Фиг. 10. Токът през транзистор ( $I_{S1}$ ) и входният ток ( $I_{R1}$ )



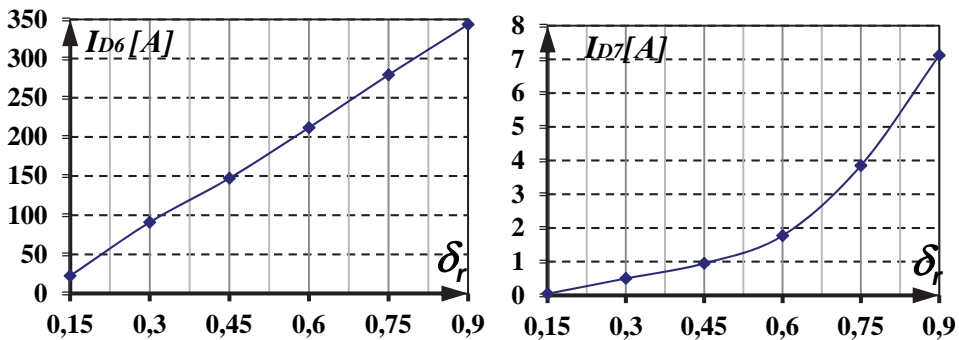
$\delta$		0,15	0,3	0,45	0,6	0,75	0,9
$I_{S1}$	A	6,09	10,24	14,75	22,26	36,88	53,18
$I_{R1}$	A	3,67	14,48	28,45	46,78	70,45	99,52



Фиг. 11. Входен ток  $I(R_1)$  и ток през транзистора  $I(S_1)$

Токово натоварване на изправите диоди  $D_6=D_8$  и обратния диод  $D_7$  фиг. 8.6.

$\delta$		0,15	0,3	0,45	0,6	0,75	0,9
$I_{D7}$	A	0,048	0,5	0,948	1,77	3,85	7,12
$I_{D6}$	A	22,49	90,96	147,2	211,9	279,1	343,6

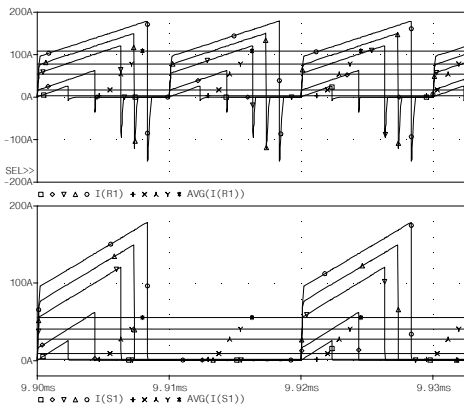


Фиг.12. Токът през изправителния диод  $I(D_6)$  и ток през обратния диод  $I(D_7)$

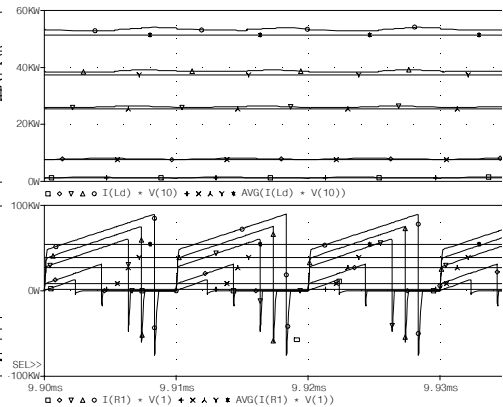
Сравняването на сметите зависимости на централизираното и децентрализираното управление показва:

1. Няма големи разлики в средните стойности на токовете и мощностите на инвертора.
2. Има разлика във формата на тока в транзисторите, като при малки заваръчни мощности нараства реактивния ток в инвертора.

За да се оцени влиянието на използваните защитни вериги е реализирано изследване без наличие на защитни вериги. На следващите времедиаграми и графики са показани части от тези изследвания при централизирано управление.

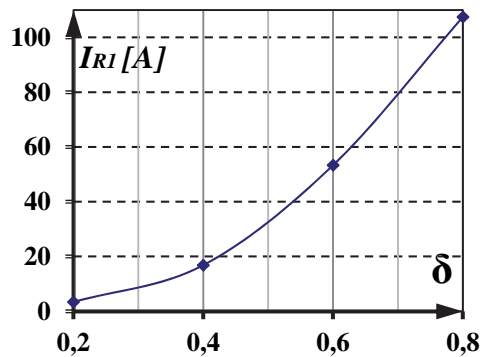
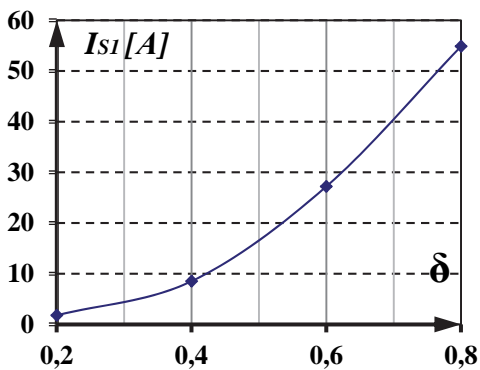


Фиг.13. Входен ток  $I(R_1)$  и токът през транзистора  $I(S_1)$



Фиг.15. Входна, изходна мощност и к.п.д. на инвертора

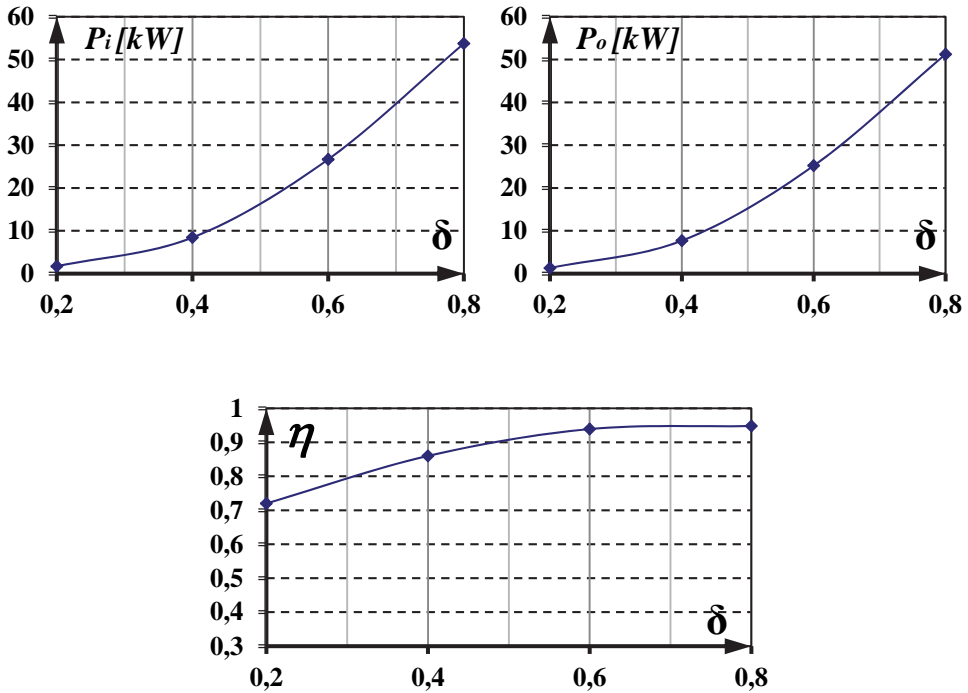
$\delta$	0,2	0,4	0,6	0,8	
$I_{S1}$	A	1,8	8,53	27,22	54,88
$I_{R1}$	A	3,41	16,86	53,37	107,5



Фиг. 14. Ток през транзистора  $I(S_1)$  и входен ток  $I(R_1)$



$\delta$	0,2	0,4	0,6	0,8
$P_i$ kW	1,71	8,43	26,69	53,75
$P_o$ kW	1,31	7,69	25,21	51,24
$\eta$	0,72	0,86	0,939	0,948



Фиг. 16. Входна, изходна мощност на инвертора и к.п.д.

Влиянието на допълнителните защитни вериги се състои в:

1. Увеличава се скоростта на нарастване по ток ( $di/dt$ ) и по напрежение ( $du/dt$ ), което води до увеличаване на стресовото натоварване на активните елементи на схемата.
2. В енергетично отношение това не оказва влияние на работата на инвертора.

От направените изследвания могат да се направят следните изводи:

1. Автономният инвертор на напрежение и елементната база позволяват да се реализира многопостов заваръчен агрегат, особено удобен в приложение на роботизирани заваръчни агрегати (газопроводи, ел.двигатели и др.).
2. Предложената схема има много добра управляемост на заваръчния ток при централизирано или децентрализирано управление.

3. При централизираното управление на заваръчния агрегат се получава по-лек режим за инвертора.

4. Използването на малка бобина за мек старт на входа на инвертора и RC верига, включена в диагонала на моста, подобряват работата на инвертора. Подобриенето се състои в:

- намаляване на стресовото претоварване по ток и предпазване от пренапрежение на транзисторите.
- повишаване на КПД на схемата.

#### Литература:

- [1] V. Valchev, D. Mareva, and D. D. Yudov, “Inverter current source for pulse arc welding with improved parameters,” MIPRO-2017, May 22-26, 2017, Opatija, Croatia, pp.139-143
- [2] Dimitar Yudov, Georgi Todorinov, Daniela Mareva „INVERTER SUPPLY FOR PULSE ARC WELDING ” 2006, BFU
- [3] A. Van den Bossche and V. C. Valchev. *Inductors and transformers for power electronics*, Boca Raton: CRC press, 2005.
- [4] Kanchev, H.C., Hinov, N.L., Arnaudov, D.D. and Hranov, T.H., Current fed inverter application as a controllable DC load, XXV International Scientific Conference Electronics (ET), 12-14 Sept. 2016, Bourgas, Bulgaria.