

**СРАВНЕНИЕ НА СХЕМОТЕХНИКАТА НА ИНВЕРТОРНИТЕ ЕЛЕКТРОЖЕНИ****SCHEMATICS COMPARISON OF WELDING INVERTERS****Доброслав Данков\***

ТУ-Габрово, кат. "Електроника"

Статията е постъпила на 07.10.2013 г.; приета за отпечатване на 15.10.2013 г.

**Abstract**

This paper evaluates several DC-DC power converter topologies suitable for arc welding focusing on MMA type (Manual Metal Arc). The aim is to outline the main characteristics of this process that directly affect the electronic design of the DC-DC converter and to set criteria to select the most adequate. They will be compared taking into account schematics, volume, weight, cost and functionality.

**Keywords:** Arc welding, MMA welding, High frequency power converters, Two switch forward converter, Full-bridge converter.

**ВЪВЕДЕНИЕ**

С развитието на елементната база на силовата електроника - масовото производство на евтини мощни MOSFET и IGBT транзистори, стана възможно и икономически целесъобразно производството на заваръчни токоизточници, построени на базата на високочестотни транзисторни преобразуватели с двойно преобразуване на честотата. В техническата литература и фирмените каталози за този клас токоизточници се е наложило понятието „инверторни електрожени“ /ИЕ/. Преносимите ИЕ се използват за ръчно електро-дъгово заваряване /ММА/ с всички видове електроди, включително неръждаеми и др. Инверторната технология позволява заваръчната машина да бъде лека, с малък обем и високи параметри, недостижими за старите трансформаторни машини. Предимствата на ИЕ могат да се обобщат така:

1. Малко тегло и обем вследствие на високата работна честота в обхвата 20 – 100 kHz.

2. Ниска консумация на електроенергия. КПД на машината е над 85% и тя е енергоспестяваща в сравнение с трансформаторните електрожени.

3. Възможност за съвместна работа с преносим електрогенератор - 230V  $\pm$  15%, 50 $\div$ 60 Hz.

4. Лесна работа - имат следните вградени функции: "горещ старт" - позволява лесно запалване на дъгата; "защита от залепване" - в случай на залепване електрода лесно може да се отдели; "стабилна дъга" - повишава тока при силно доближаване на електрода до заваръчната вана. Повечето модели за професионално използване са с микропроцесорен контрол, което позволява работа и при TIG и MIG/MAG заварки.

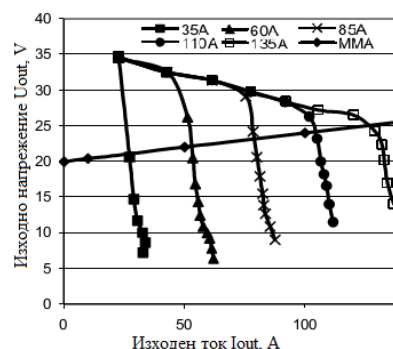
Целта на тази статия е да се направи обобщение в еволюцията и съпоставка на схемотехниката на инверторните електрожени и се открият някои аспекти в бъдещото им развитие.

**ИЗЛОЖЕНИЕ**

Електрическите параметри на електрическата дъга се характеризират с големи токове при относително малки напрежения. Тъй като напрежението в процеса на заваряване се променя в малки граници, изходният ток е определящ за изходната мощност на инверторния електрожен. Изходният ток  $I_{out}$  варира от 50А до 80А при малките машини, до около 800А при комбинираните заваръчни модулни станции. Изходното напрежение  $U_{out}$  при ММА е обикновено от 20 до 30 V. То се определя от дължината на заваръчната дъга. При режим на празен ход обаче, напрежението трябва да е по-голямо, между 50V и 100 V за лесно запалване на дъгата. Като се има в предвид действащия стандарт EN 60974-1 ИЕ удовлетворяват две изисквания:

- Статичната характеристика на машината (фиг.1 – вертикалните линии при различни токове), която е зависимостта между средната стойност на изходното напрежение и изходния ток.

- Волт-амперната характеристика на електрическата дъга, която е леко увеличаваща се хоризонтална линия, означена като ММА на фиг. 1.



Фиг. 1. Експериментални статични изходни характеристики на електрожен за ръчно заваряване, съпоставени с волт-амперната характеристика на процеса (ММА).

Работната точка на ИЕ се определя в пресечните точки на двата вида характеристики – на изходната характеристика на инверторния електрожен и тази на товара. Системата за управление в ИЕ лесно осигурява тези режими чрез въвеждането на задължителните обратни връзки по напрежение и ток. Обратната връзка по напрежение се осъществява чрез използването на резистивни делители и оптична развръзка, когато е необходимо. Обратната връзка по ток се осъществява чрез шунтов резистор, чрез токов трансформатор или чрез измерване на тока със сензор на Хол.

Опростено модела на ел.дъга представлява последователно свързани източник на напрежение със стойност 20V и съпротивление със стойност 0,04 Ω [1]. Аналитично дъгата като товар се описва с уравненията:

$$I_L < 600 \text{ A: } U_L = (20 + 0.04 \cdot I_L), \text{ V} \quad (1)$$

$$I_L > 600 \text{ A: } U_L = 44 \text{ V} \quad (2)$$

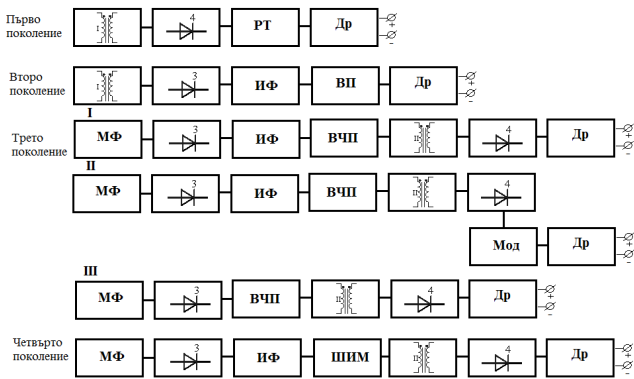
където  $I_L$  и  $U_L$  са тока и напрежението на дъгата.

Инверторните електрожени, независимо от схемата която използват, отговарят на следните условия:

- 1) Имат галванично разделяне от захранващата мрежа към която се свързват.
- 2) Осигуряват филтриран постоянен ток на изхода си (обикновено 50A-200A), при напрежение 20V-30V.
- 3) Изходния ток се регулира в широки граници.
- 4) Работят нормално при късо съединение на изхода.
- 5) При режим на празен ход осигуряват 50V-100V изходно напрежение, като типичното е 90V.

### Еволюция на транзисторните захранващи източници за електро-дъгово заваряване.

Първите опити за използване на транзистори в източниците за микрозаваряване са от 1960-те години [2]. Използват се във вторичната намотка на мрежовия заваръчен трансформатор за регулиране стойността на изходния ток.



Фиг. 2. Еволюция на транзисторните заваръчни източници: РТ — регулиращ транзистор в активен режим; МФ — мрежов филтър; ИФ - изглаждащ филтър; ВЧП — високочестотен преобразувател; ВП- вторичен преобразувател; Мод - модулатор; Др -дросел; ШИМ — широчинно импулсен модулатор; 1- мрежов трансформатор; 2 — ВЧ трансформатор; 3- мрежов изправител; 4-ВЧ изправител.

Необходимата външна характеристика се осъществява с помощта на обратна връзка по напрежение и транзисторите работят в активен режим. Поради големите загуби върху транзисторите, те по-нататък са заменени с мощни тиристоры и тяхното използване в заваръчните токоизточници е ограничено.

Повишението на надеждността на ВЧП е свързано с използването на високочестотни силови елементи, спо-

собни да работят в ключов режим. Именно такива елементи работят при второто поколение транзисторни инвертори в блока на вторичния преобразувател (ВП), работещ вече в ключов режим. По такъв начин, аналоговия регулатор става импулсен и статичните загуби в транзисторите значително намаляват. Въпреки това, решението не води до съкращаване на разходите за активни елементи и не води до намаляване на габаритите, защото се използва пак мрежов заваръчен трансформатор. Третото поколение на транзисторните заваръчни токоизточници, което е свързано с появата на пазара на надеждни високоволтови транзистори с добри динамични параметри и малки загуби, започва интензивно да се развива през 1990-е години. По това време се появяват множество схемни решения с безтрансформаторен вход, което позволява да се намалят масогабаритните характеристики на заваръчните източници. Тези схеми използват ВЧ трансформатори, които се включват на изхода на ВЧП, т.е. това са първите ИЕ. Масата и габаритите на тези ИЕ в сравнение с традиционните заваръчни трансформатори намаляват 40-50 пъти. Въвеждането на обратни връзки по ток и напрежение позволява създаването на универсални заваръчни преобразуватели за всички видове дъгови заварки, а така също и за тези с нетопим електрод. В последните години тенденцията за усъвършенстване на ИЕ се наблюдава при всички водещи фирми-производители. Например за заваряване на алуминиеви сплави са създадени ИЕ с променливотоков изход, с регулиране както на амплитудата, така и продължителността на положителната и отрицателната част на периода [3]. Това става, като в схемата на транзисторния преобразувател се вгражда допълнителен модулатор Мод (фиг. 2, II), подобряващ не само технологическите свойства на източника, но и намаляващ потреблението на енергия от мрежата. В други решения от това поколение отсъства кондензаторният изглаждащ филтър ИФ на изправеното мрежово напрежение. В тези ИЕ (фиг. 2, III) се реализира синхронно изправяне на мрежовото напрежение, а при някои схемни решения се използва и синхронно изправяне на високочестотното напрежение на вторичната страна на ВЧ трансформатор с използването на транзистори, най-често MOSFET, вместо изправителни диоди. Следващия етап в развитието на транзисторните заваръчни токоизточници - четвъртото поколение, започва в началото на новото хилядолетие и е свързано с появата на мощни модули, представляващи съгласувани диодно-транзисторни структури (диода и транзистора имат еднакви работни токове и напрежения) от типа транзистор-диод, диод-транзистор или транзистор-транзистор. По този начин отново се намаляват масата и габаритите на ИЕ, като същевременно се подобряват надеждността и ремонтнопригодността.

По-нататъшното развитие на ИЕ е свързано с появата на нови материали, блокове и възли на силовата електроника и микропроцесорната техника, така че аналоговото управление се заменя с цифрово, като се използват алгоритми за управление с размита логика и невронни мрежи на базата на ново поколение сигнални процесори или програмируеми логически матрици.

### Основни преобразувателни схеми използвани при ИЕ

При проектирането на ИЕ се използват различни схеми, изпълнени главно на мощни силициевы транзи-

стори IGBT или MOSFET, тъй като транзисторите на базата на SiC или GaAs, независимо от техните по-малки времена на превключване, са относително скъпи. От известните схемни решения се използват еднотактни прав (ПП) и обратен преобразователи (ОП) [7], еднотактни двутранзисторни (ДПП) [4], двутактни полумостови (ПМП) и мостови (МП) преобразователи [5,8]. Стремеха за подобряване на енергийните показатели, а така също повишението на работната честота на преобразуване води до създаването на резонансни схеми на ИЕ [3]. По мнението на много автори този път на развитие на ИЕ е най - перспективен, поради по-високите КПД и честота, както и ниските нива на електромагнитни смущения. За да се обобщят общите тенденции в развитието на ИЕ и да се открият характерните им особености се разглеждат някои схемни решения на ИЕ на известни производители на заваръчна техника.

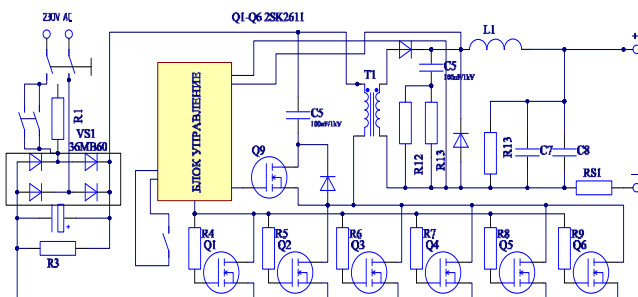
В табл.1 са обобщени схемните решения на преобразователите в някои налични на пазара ИЕ.

Табл.1 Схемни решения на комерсиални ИЕ

Преобр.	Фирма	Модел	$I_{out}, A$
ПП с MOSFET	ESAB	LHQ 150 LTV 150	150
ДПП с MOSFET	Lincoln Electric	Invertec V1305	130
ДПП с MOSFET	ESAB	MiniArc 140	140
ДПП с MOSFET	ESAB	Caddy 200	200
ПМП с IGBT	Thermadyne	ThermalArc 160S	160
Двоен ПМП с IGBT	Thermadyne	ThermalArc 250S	250
МП с IGBT	“Линкор“Ltd	ВД-315УД2	315
МП с MOSFET	Miller Electric	Maxstar 150	150
МП с MOSFET	Miller Electric	Maxstar 140	140

### Понижаващ прав преобразовател (ПП) с ШИМ регулиране на изходния ток.

Шведската фирма ESAB, един от водещите производители на заваръчно оборудване, произвежда интересни от гледна точка на схемотехниката на силовата част ИЕ, тип LHQ 150 и LTV 150, в които се използва топологията на еднотактния прав преобразовател с активно отстраняване на пренапрежението върху транзистора (forward converter with active clamp) [7]. Схемата на силовата част на този ИЕ е показан на фиг. 3.



Фиг. 3. Схемата на еднотранзисторен прав преобразовател в ИЕ тип LHQ 150 на ESAB.

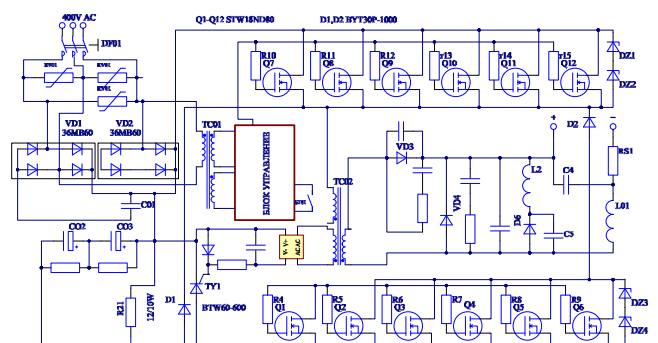
В по-новите модели тази топология не се среща – това показва, че тези модели са експериментални от които фирмата по-нататък се е отказала.

Този клас еднотактни преобразователи обаче, е изследван в ред публикации като достатъчно перспективен [2]. Въпреки, че в съвременните модели на ИЕ на фирмата ESAB такова решение не се използва, то преобладава в моделите от най-ниския ценови диапазон, например в ИЕ Colt 1300 на фирмата Semont.

Недостатъците на схемата са свързани, както със спецификата на работа на преобразователя, така и с необходимостта от подбор на MOSFET транзисторите, които са свързани паралелно, което затруднява ремонтнопригодността на изделието. Замяната на MOSFET с IGBT модули е възможно решение, но поради ред причини не се е наложило.

### Двутранзисторен прав преобразовател (ДПП).

Схемата на еднотактния двутранзисторен прав преобразовател на MOSFET и IGBT транзистори е получила широко разпространение при създаването на ИЕ, работещи при  $I_{out}$  до 300 А. Тази схема се явява класическа за ИЕ с битово и полу-професионално предназначение. При по-големи мощности и за професионални цели се предпочитат полумостови и мостови преобразователи. Едни от най-разпространените промишлени модели, реализирани по тази схема са електрожените от фамилията Caddy на ESAB [4]. Силовата схема на такъв инверторен електрожен е представена на фиг. 4 и е съставена от ключовите транзистори Q1-6 и Q7-12, рекупериращите диоди D1, D2, силовия трансформатор TC02, изходния изправител VD3-VD4 и изходния филтров дросел L2. Този ИЕ е предназначен за заварка по технологиите MMA и TIG, с максимален заваръчен ток 200 А [4]. Отделните модификации – за 200А, 140А и 130А изходен ток се различават само по броя на транзисторите и захранващото напрежение. В случая схемата отговаря на модела Caddy 200. Преобразователят работи при честота 37kHz при максимален коефициент на запълване  $D=0.42$ , което гарантира време за пренамагнитване на магнитопровода по време на неработния полу-период.

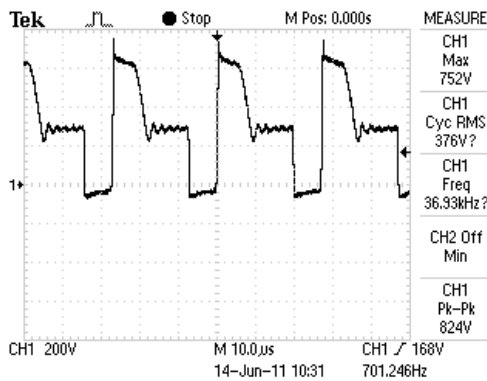


Фиг. 4. Схемата на двутранзисторен прав преобразовател в модела Caddy200 на ESAB.

Елементите към изправителя D6, C4, C5 и L2 са предназначени за устойчиво горене на дъгата при малки изходни токове. Драйверите на MOSFET са с трансформаторна галванична развръзка и осигуряват на гейтовете на транзисторите напрежения със стойност +16/-4V. Използването на отрицателното запущащо напрежение е с цел да се повиши надеждността на упра-

влението на мощните MOSFET. За температурна защита се използва температурен сензор ST01, монтиран в намотката на силовия трансформатор TC02. Силовият трансформатор работи в режим с големи загуби, за да се намали неговия обем. Този ИЕ, както и модела Maxstar 151, работят с обратна връзка по среден ток в товара, като се използва резистивен шунт 200 A/120 mV. Прави впечатление, че в схемата на инвертора липсват защитни RC групи, които обикновено се използват за защита от пренапрежения при схемите с принудително изключване на транзистора, характерни при ШИМ регулиране на изходния ток. Тук тази функция играят защитните диоди 1.5KE300A.

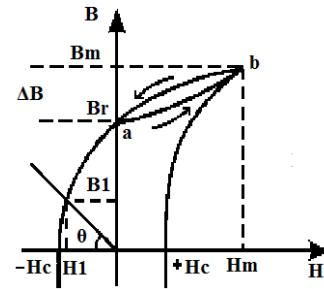
Ако се разгледа документацията на други модели от по-ново поколение – Caddy Arc 150i, Caddy Tig 150i и Origo Tig 150i, то забелязва, че фирмата ESAB продължава да използва ДПП като прави някои подобрения. Измененията засягат мощните MOSFET транзистори – те са заменени с един мощен IGBT модул, в който е интегриран и шунтиращия тиристор TY1, входния диоден мост и схемата за захранване на системата за управление, т.е. имаме типичен случай на преход от 3-то към 4-то поколение ИЕ. Мрежовия захранващ трансформатор TC01 и линейните стабилизатори на напрежение са заменени с импулсен захранващ блок с обратен (flyback) преобразувател. Това позволява работната честота на инвертора да се повиши до 65 kHz при използване на същите драйвери с трансформаторна галванична връзка.



Фиг. 8. Характерно напрежение на дрейна на транзистор в ДПП при изходен ток 160А.

Общ недостатък на еднотактните преобразуватели е факта, че трансформатора им работи при едностранно намагнитване. Магнитната индукция  $B$  в трансформатора с едностранно намагнитване може да се изменя само в диапазона от максималната  $B_m$  до остатъчната  $B_r$ , описваща частна хистерезисна крива.

Когато транзисторите Q1-6 и Q7-12 в преобразувателя са отпушени, енергията от мрежата чрез трансформатора TC02 и изходния изправител постъпва в товара – електрическата дъга. При това магнитопровода се намагнитва по кривата a-b на фиг. 9. Когато транзисторите са запушени, тока в товара се осигурява от изходния дросел L2. В този момент, под действието на ЕДН на първичната намотка на трансформатора се отпушват диодите D1, D2 и през тях протича ток на размагнитване на магнитопровода на трансформатора в обратна посока (участък b-a на фиг. 9).



Фиг. 9. Процес на пренамагнитване на магнитопровода на ДПП

Изменението на индукцията  $\Delta B$  в магнитопровода е от  $B_m$  до  $B_r$  и е значително по малко от  $\Delta B = 2B_m$ , възможно при двутактните преобразуватели.

Допълнително изменение на  $\Delta B$  може да се получи с помощта на немагнитна междина в магнитопровода. Ако се въведе немагнитна междина  $\delta$  в магнитопровода, то остатъчната индукция става по-малка от  $B_r$ .

Новото значение на остатъчната индукция може да се намери в пресечната точка на правата, построена от началото на координатната система под ъгъл  $\theta$ , към хистерезисната крива (точка B1 на фиг.9):

$$tg\theta = \mu_0 \cdot l_c / \delta \quad (3)$$

където  $\mu_0$ - магнитна проницаемост на вакуума равна на

$$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}, Hr / m \quad (4)$$

$l_c$  – дължина на средната силова магнитна линия в магнитопровода, m;

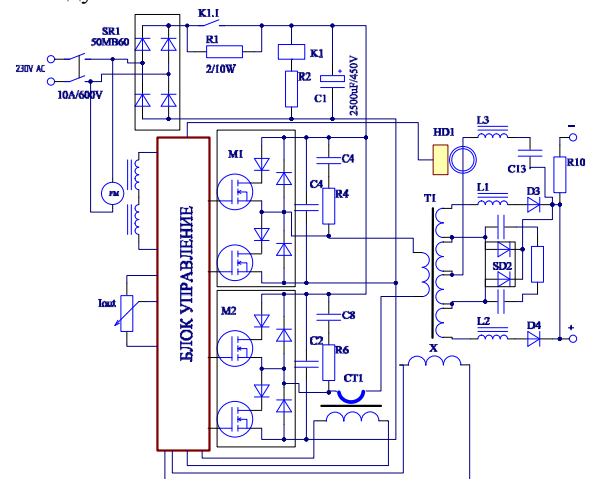
$\delta$  – дължина на немагнитната междина, m.

Величината  $tg\theta$  може да се разглежда като проницаемост на междината, приведена към дължината на магнитопровода. По този начин въвеждането на немагнитната междина става еквивалентно на въвеждането на магнитно поле с отрицателна напрегнатост:

$$H_1 = -B_1 / tg\theta \quad (5)$$

### Мостов преобразувател с ШИМ-регулиране.

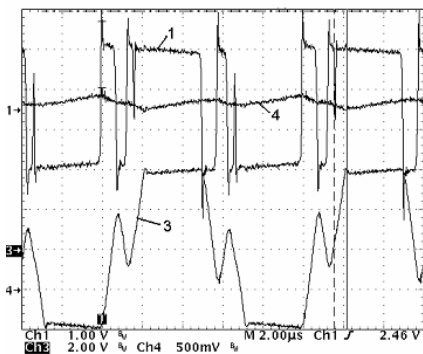
Типичен представител на ИЕ по тази схема е MAXSTAR151 на фирмата MILLER ELECTRIC. Заваръчния токоизточник Maxstar 151 е предназначен за заварки по технологиите MMA и TIG при максимален ток до 150 А. Това е типичен представител на 3-то поколение ИЕ от началото на 90-те години на миналия век, но тази схематехника се използва от фирма Miller Electric и днес [8]. Силовата част представлява класически мостов преобразувател на мощни MOSFET транзистори, конструктивно изпълнени във вид на полумостови модули M1 и M2.



Фиг. 10. Схема на силовата част на ИЕ Maxstar 151



Известно е, че паразитните диоди на стандартните MOSFET транзистори не могат да бъдат използвани в качеството на рекуперационни диоди при „твърда“ комутация при индуктивен товар. Затова в случая се използва стандартно решение: към сорсовете на транзисторите се включват блокиращи диоди (обикновено Шотки диоди), а вътрешните диоди се заменени с външни антипаралелни от типа ULTRAFast. Мостовият преобразувател работи в режим на стабилизация по среден ток на товара, стойността на който се измерва с помощта на сензор на Хол HD1. Още едно достатъчно разпространено решение се явяват допълнителните навивки на трансформатора w2.3 и w2.4, свързани към елементите L1, L2, D3, D4, предназначението на които е да се осигури напрежение при празен ток със стойност от 60 до 90V. За намаляване амплитудната стойност на тока е необходимо да се намали коефициента на трансформация на изходния трансформатор T1, но това води до намаляване на напрежението при празен ход, което на свой ред води до трудно запалване на дъгата.



Фиг. 11. Експериментални времодиаграми от работата на МП в ИЕ на изходния ток  $I_{out} = 115A$  ( времодиаграма 4, 25A/div) при изходно напрежение 25V. На 1 е показано напрежението на първичната намотка на трансформатора (200V/div) и съответно тока - крива 3 (10A/div).

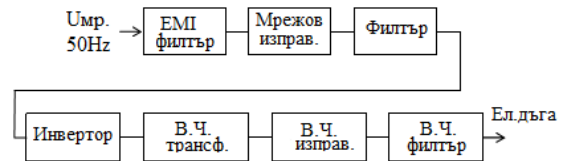
Техническото решение, което използва Miller Electric в Maxstar 150, позволява да се намали коефициента на трансформация при запазване на високото напрежение на празен ход. На фиг. 11 е показана осцилограма от работата на инвертора, като ясно се вижда наличието на задължителна пауза между транзисторите в едно рамо, като вторични отскоци в напрежението на първичната с продължителност около 1μs. По тази схема се произвеждат и ИЕ от 4-то поколение, като се използват по-съвременни IGBT модули.

### Сравнение на DC-DC преобразувателите с ШИМ регулиране на тока в ИЕ.

Критериите по които могат да се сравнят различните схеми на ИЕ са свързани с начина на работа на преобразувателя, обема и масата на електрожена и цената на компонентите. Затова в тази връзка се систематизират работните режими, напреженията и токовете на активните елементи, загубите в ключовите транзистори и от там площта на радиаторите, работата на магнитните елементи – трансформатори и дросели, тъй като те непосредствено влияят върху обема и цената на крайното изделие. По същество ИЕ представлява DC-DC преобразувател, свързан към входен изправител с изправено напрежение около 330V DC получено от изправянето на стандартното мрежово напрежение ~230V AC. Както се вижда от представените схеми на ИЕ, в тях се използват DC-DC преобразуватели с различни работни ре-

жими и различни допълнителни функции, например като корекция на фактора на мощността [6].

Предназначението на електронния транзисторен преобразувател е да се осъществи галванична изолация от мрежата и се осигурят изходни напрежение и ток за нормалното горене на електрическата дъга. Преобразувателят обикновено включва високочестотен трансформатор, мощни транзистори като ключови елементи, високочестотен изправител и филтри, както е показано на фиг. 12. Като вземем под внимание изискването на галванична развръзка, всички топологии на класическите DC-DC преобразуватели без трансформатор не са подходящи и не се използват в ИЕ. Подходящите и използвани в различни модели и марки са едноклучовите прав и обратен преобразуватели, двутранзисторния прав преобразувател, полумостовия и мостов преобразуватели с ШИМ регулиране на изходния ток.



Фиг. 12. Схема на основните блокове в ИЕ

Преобразувателят със средна точка на трансформатора не се използва в ИЕ поради високото напрежение върху транзисторите и сложната конструкция на трансформатора за осигуряване на симетричност.

Правия и обратния преобразуватели са много различни по отношение на филтриране на изходния ток при ИЕ. Обратния преобразувател има по-големи амплитуди на тока, които натоварват филтриращия кондензатор. Използването на филтриращ дросел е допустимо само при правия преобразувател и затова тази топология е предпочитана при ИЕ.

По отношение на режимите на работа на ключовите елементи, те са обобщени в табл.2, като отделните параметри са:

- $f_{sw}/f_{out}$ : съотношение между работната честота на транзистора и изходната честота на инвертора;
- NoT: брой на транзисторите в инвертора;
- $U_{Tmax}$ : максимално напрежение на транзисторите през интервала  $t_{off}$  в запушено състояние;
- $I_{Tmax}$ : максимален ток през транзистора през интервала в проводимо състояние  $t_{on}$ ;
- NoD: брой на използваните диоди;
- $U_{Dmax}$ : максимално напрежение през интервала  $t_{off}$ ;
- $I_{Dmax}$ : максимален ток през интервала  $t_{on}$ .

Табл.2. Параметри за сравняване на топологиите на DC-DC преобразуватели с ШИМ регулиране на тока в ИЕ

Тип преобр.	Прав (ПП)	Двутранз. Прав (ДПП)	Полу-Мостов (ПМП)	Мостов (МП)
$f_{sw}/f_{out}$	1	1	0.5	0.5
NoT	1	2	2	4
$U_{Tmax}$	2.E	E	E	E
$I_{Tmax}$	$I_{out} \cdot (N_2/N_1) + i_{m\sigma}$	$I_{out} \cdot (N_2/N_1) + i_{m\sigma}$	$I_{out} \cdot (N_2/N_1)$	$I_{out} \cdot (N_2/N_1)$
NoD	2	2	2	2
$U_{Dmax}$	E.(N <sub>2</sub> /N <sub>1</sub> )	E.(N <sub>2</sub> /N <sub>1</sub> )	E.(N <sub>2</sub> /N <sub>1</sub> )	2.E.(N <sub>2</sub> /N <sub>1</sub> )
$I_{Dmax}$	$I_{out}$	$I_{out}$	$I_{out}$	$I_{out}$

Параметрите са дефинирани, като са взети под внимание стойността на изправеното напрежение  $E$ , коефициента на трансформация (съотношението между броя на първичната и вторичната) ( $N_1/N_2$ ), максималната стойност на тока на подмагнитване ( $i_{mag}$ ) и изходната стойност на тока ( $I_{out}$ ).  $I_{out}$  е свързан с номиналната мощност на машината като цяло и е основен параметър за избор на ИЕ.

Трябва да се отбележи, че трансформаторът в едноклучовия прав преобразувател има трета размагнитваща намотка със същия брой навивки като първичната, така че конструкцията му е усложнена в сравнение с другите топологии. Това и определя и максимален коефициент на запълване от 0.5, въпреки че за други приложения може да работи и при голяма стойност. При това максималното напрежение на транзистора е удвоеното изправено мрежово напрежение  $E$ . При двутранзисторния прав преобразувател максималното напрежение на транзистора е  $E$ , тъй като е ограничено чрез рекуперирани диоди, като третата намотка на трансформатора не е необходима. Като недостатък на схемата може да се отбележи само използването на двоен брой транзистори и диоди, но предимствата на схемата го оправдават.

При полумостовата и мостова схема обикновено се използва трансформатор със среден извод на вторичната с цел да се намалят броя на използваните високочестотни изправителни диоди за голям ток. Тока през транзисторите не се отличава много като стойност, независимо от симетричната работа на трансформатора и липсата на ток на намагнитване. Главната разлика е по отношение на коефициента на трансформация ( $N_2/N_1$ ) необходим за осигуряване на дадена стойност на изходния ток  $I_{out}$ . В случая на ДПП и ПМП коефициента на трансформация е двоен спрямо МП, но той използва двоен брой транзистори – 4, въпреки че тока през тях е двойно по-малък.

ПМП и МП осигуряват симетрично променливо напрежение на трансформатора, така че се използва 1-ви и 3-ти квадрант на кривата на намагнитване (характеристиката  $V=f(H)$  на магнитопровода). По този начин магнитопровода се използва по-пълно и от там намаляват размерите и масата на трансформатора, което е много важно при ИЕ с оглед на тяхната мобилност и намаляване на цената.

От друга страна по отношение на съотношението на работната честота на транзисторите и честотата на изходното напрежение на инвертора при тези два инвертора то е 0.5, което влияе върху честотата на пулсациите на изходния дросел, а от там намаляване на неговата маса и цена при една и съща стойност на изходния ток. Главната разлика между ПМП и МП е по отношение на използването на разделителни кондензатори в първата топология, които трябва да са неполярни с големи капацитет и напрежение и са много по-скъпи от използваните транзистори при ИЕ с изходен ток до 200А.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализът на схемотехниката на съвременните ИЕ позволява да се направят някои изводи. На първо място трябва да се отбележи, че производителите на заваръчно оборудване използват разнообразни топологии в силовата част на ключовия преобразувател в ИЕ, както

двухактни, така и еднотактни. Би трябвало да се очаква, че поради редица предимства на двухактните преобразуватели и теоретично по голямата им ефективност производителите ще се ориентират предимно към ПМП и МП, но на практика най-разпространената топология остава ДПП.

Главното достоинство на двутранзисторният прав преобразувател в качеството на основа на заваръчен инвертор е неговата лесна реализация, ремонтно пригодност и практическа надеждност. При този преобразувател са избегнати недостатъците на двухактните преобразуватели: невъзможност за протичане на токове на късо съединение през силовите ключове и отсъствие на проблема за симетриране на процеса на пренамагнитване на магнитопровода на изходния трансформатор, тъй като трансформатора работи нормално с подмагнитване и са взети конструктивни мерки за правилната му работа предварително. Освен това напрежението на запущен транзистор не превишава захранващото, а енергията запасена в паразитната индуктивност на разсейване се рекуперира в захранващия източник.

Все пак при по-високи изходни мощности, както при професионални ИЕ, работещи в заваръчни станции от модул тип се предпочитат мостовите схеми от 4-то поколение.

Резонансните инверторни схеми, независимо от множеството публикации и експериментални прототипи на ИЕ не се използват масово, като се срещат предимно в моделите на китайски фирми в ниския ценови диапазон. Причините може би се крият в претоварването на пасивните елементи (например напрежението на резонансния кондензатор достига 3kV[5]) и от там оскъпяването на изделието като цяло, независимо от факта, че активните елементи работят в режим на „мека“ комутация по напрежение тип ZVS и/или ток – ZCS.

Друга причина за избягване на резонансните и квази-резонансни схеми се явява начина на регулиране на изходния ток. Предпочита се използването на ШИМ регулиране за сметка на честотното или с изместване на фазата между диагоналите в мостовите схеми, характерно за резонансните преобразуватели.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Данков Д., П. Проданов, М. Симеонов. Изследване и симулация на инверторен електрожен. Електроника 2012 – XI Национална конференция с международно участие, ISSN 1313-3985, 14-15.06.2012 г. стр.144-149.
- [2] Петров С. Схемотехника промышленных сварочных инверторов. Современная электроника, №8 2007, стр.42-47.
- [3] Blasco N., Martinez A., Pérez Cebolla F. Evaluation of power converters for MMA arc welding. IEEE Trans. On Power Electronics vol.55, No.6, June 2007, pp. 365 – 370.
- [4] Caddy 150/Caddy Tig 150 LHQ 150/LTV 150 Service Manual. ESAB Welding Equipment AB, 2000.
- [5] Dzurko P., Dudrik J., Višny P., Behaviour of arc welder with high frequency LCC resonant converter, 9th International Conference on Power Electronics and Motion Control - EPE-PEMC 2000 Košice, pp. 4-102 – 4-106.
- [6] Mecke H., Fischer W., Werter F. Soft switching inverter power source for arc welding. EPE'97 Conf. 1997. Trondheim. PP. 4333-4337.
- [7] LHN 130/140/200 Caddy 130/140/200 Service Manual. ESAB Welding Equipment AB, 2004.
- [8] [http://www.millerwelds.com/pdf/spec\\_sheets/DC27-0.pdf](http://www.millerwelds.com/pdf/spec_sheets/DC27-0.pdf)