

# ТЕНДЕНЦИИ В РАЗВИТИЕТО НА ТОКОЗАХРАНВАЩИТЕ ИЗТОЧНИЦИ В УРЕДБИТЕ ЗА ИНДУКЦИОННО НАГРЯВАНЕ

Проф. д. т. н. инж. Т. С. Тодоров

Технически университет - Габрово

Some important tendencies and achievements in the development of power supply sources in installations for induction heating are discussed:realisation mainly with IGBT and MOSFET, use of series compensation of the load and, respectively, autonomous inverters with reverse diodes, matching and regulation in wide range by means of frequency and controllable transformers and capacitors, etc.The paper also presents the trends for developing converters with energy dosing, series-parallel resonance inverters with optimum dimensioning with and without reverse diodes, single-switch inverters with percussion action.Some data are presented, concerning the general theory and design of autonomous current inverters and resonance inverters.

Токозахрънващите източници (ТЗУ) на уредбите за индукционно нагряване (УИН) вече дълги години продължават да бъдат интересен обект от научно - техническа, производствена, експлоатационна и бизнес гледна точка. До началото на 60-те години в УИН с честота до 10 kHz се използваха машинни (въртящи се) преобразуватели, а при честоти 70kHz и нагоре - лампови генератори. Честотният диапазон 10-70 kHz не се използваше. Преобразувателите с автономни инвертори (АИ) с йонни прибори, макар и да се разработваха в редица страни с влагане на големи материални и интелектуални ресурси, не можаха да се наложат.

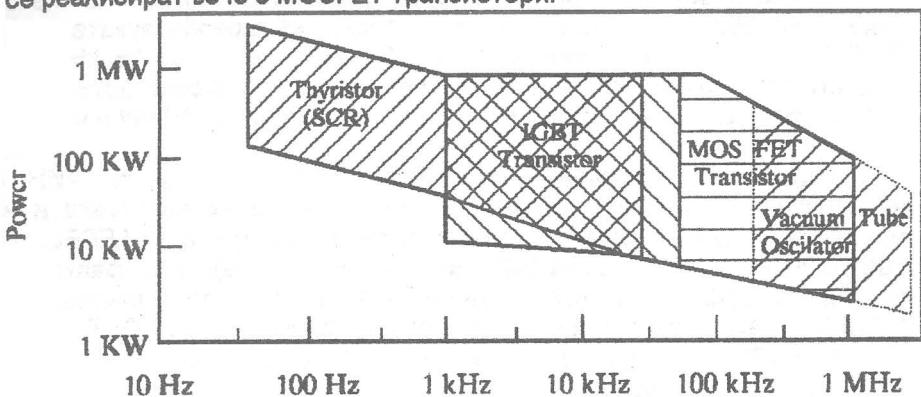
Повече от три десетилетия в средночестотния диапазон господстват тиристорните (с еднооперационни тиистори) преобразуватели на честотата. Първа беше фирмата ELIN UNION-Австрия. След това, почти едновременно, нейният пример беше последван от фирмите - производителки на УИН в САЩ, Япония, Европа и др. Усвояването на широка гама тиристорни преобразуватели на честота (ТПЧ) в нашата страна се извърши почти едновременно с другите страни.

С ТПЧ се удовлетвориха голяма част от изискванията, както към токозахрънващите източници, така и към УИН като цяло: висок КПД, достигащ 94 %, малки размери и маса, експлоатационна надеждност, ремонтното пригодност, значително подобряване на възможностите за регулиране и съгласуване. В настоящия момент се произвеждат ТПЧ с мощност до няколко хиляди киловата и с честота до 10-20 kHz, без да се прилага до паралелно или последователно свързване на тиристорите.

Въпреки безспорните достойнства, широкото производство и приложение на ТПЧ, оформиха се нови тенденции и се появиха съществени фактори за по-нататъшното развитие на ТЗИ в УИН. Те са предизвикани: 1) от промяната в елементната база - силова и управляща; 2) от стремежа и необходимостта за получаване на още по-добри регулировъчни и съгласуващи възможности на преобразувателите и универсалното им приложение; 3) разширяване на кръга на фирмите и организации, разработващи и произвеждащи ТЗИ на УИН.

На фиг. 1 са отразени не само тенденциите, но и утвърждаващата

се практика в изпълнението на преобразувателите за ИН с различна елементна база [2]. Трябва да се обърне внимание на две много важни особености: 1) IGBT приборите се използват в един широк честотен диапазон - от 1-2 kHz до около 50 kHz, като обхващат и честотите от периметъра на тиристорите; 2) честотите над 50 kHz и до около 500 kHz се реализират вече с MOSFET транзистори.



Frequency

фиг.1

Промените, понастоящем и в перспектива, свързани с елементната база, могат да се илюстрират с обема на производството и на продажбите на мощни полупроводникови прибори. Съгласно [7], производството на прибори за силовата електроника в световен мащаб притежава следните характерни черти. Диодите от 725 млн.\$ през 1984 г. се намаляват до 650 млн.\$ в 2000 г.; тиристорите от 430 млн.\$ стават 330 млн.\$; биполярните транзистори, плюс GTO, плюс IGBT от 95 млн.\$ се увеличават до 870 млн \$. В процентно отношение диодите и тиристорите, спрямо общия обем на мощните полупроводникови прибори, съществено се намаляват, а напълно управляемите прибори се увеличават от 8% на 48%, като увеличението е за сметка главно на IGBT.

Аналогично е положението с MOSFET-транзисторите, както с увеличаващия се обем на производството, така и с увеличаващия се годишен прираст.

Тази данни следва да подскажат, че и в научно-производствен, и в учебен аспект, трябва да имат приоритет новите прибори - IGBT и MOSFET.

Смяната на елементната база дава и в двата диапазона определени предимства: по - добро и по-лесно управление и регулиране, по-добри енергийни и масогабаритни показатели в първия диапазон, който вече се обхваща цялостно, включително и честотите 10 - 60 kHz, радикално по - добри масогабаритни и енергийни показатели във втория, кой-

то доскоро се реализираше с електронни лампи.

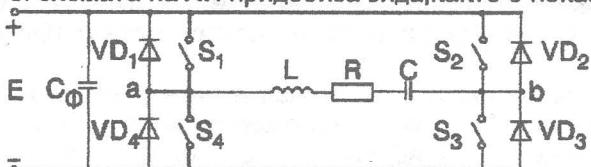
Усвоени преобразуватели в съответствие с диаграмата от фиг.1 имат американските фирми INDUCTOTERM, INDUCTONEAT, PILLAR, ECCO, LEPEL, японските TOSHIBA и HITACHI и др., както и европейските SIEMENS, ELVA и др. [6]. Има и доста по-малко известни фирми.

У нас работите в това отношение също се развиват. Налице са някои разработки и производствени серии на преобразуватели с MOSFET транзистори с мощности до 5-6 kW и честота 135 kHz (за нуждите на стоматологията, бижутерията и малките производства) и на преобразуватели с IGBT транзистори- с мощности до 20-30 kW и честота 10-30 kHz.

Характерна особеност на новото поколение ТЗИ за УИН е изненадващо широкият диапазон на изменението на честотата и на мощността. Така например преобразувателите на фирмата LEPEL, тип LSS2,5-30 имат честота  $f=50-200$  kHz и  $P=(1 - 0,09)P_{ном}$ ; фактор на мощността 0,95; изключително малки размери и маса; изпълнение с MOSFET транзистори. Аналогично е при модела LSP-12 с IGBT - 15-30 kHz с  $P=25,50,100,200,300$  и 400 kW. Това са най-съвременните изпълнения на ТЗИ за УИН.

Могат да се посочат още преобразувателите тип: MARK-12 на INDUCTOTERM с  $f=10-60$  kHz;  $P=10,20,25,30,40,50,75,100,150,200,300$  kW, като на всеки от тях мощността  $P=(1+0)P_n$ . С още по-високи параметри е преобразувателят на фирмата ELVA-Норвегия, първа в транзисторизираните широкодиапазонни ТЗИ за УИН. Например ELDEC MEG50 има мощност 1,5-50 kW;  $f=9-30$  kHz. Това се счита за най-малкия по размери и маса преобразувател с универсално приложение; STATITRON SP-12 на INDUCTONEAT, на който  $f=10-30$  kHz,  $P=25-1200$  kW; UNIPOWER V2- $f=10-30$  kHz, 25, 50, 100 kW. В радиочестотния диапазон е същото -  $f=50-200$  kHz и нагоре, дълбоко, почти до нула регулиране на мощността. Аналогични постижения има фирмата SIEMENS - Германия, както и някои други европейски фирми. Достиженията на много от фирмите, традиционно работници в областта на УИН, още не са известни, но се знае, че всички те работят в съответствие с новите тенденции.

Получаването на толкова широки регулировъчни характеристики се оказа възможно чрез използването в схемите на преобразувателите АИ не с паралелна, а с последователна компенсация на товара (на индуктора), т. е. схемата на АИ придобива вида, както е показана на фиг.2



фиг.2

Инверторът от фиг. 2 в променливотоковата си верига има еле-

менти L и R, които представлят параметрите на индуктора, и кондензатора C, който е компенсиращ и комутиращ. Както се вижда, извън това инверторът има само един допълнителен елемент - кондензаторът C. Получаващата се естествена простота не е единствено предимство на инвертора. Най-важното е, че той е еквивалентен на последователен инвертор с активен товар, мощността на който може да се регулира лесно и в широки граници с изменение на работната честота. Спрямо АИ с паралелен трептящ кръг в променливотоковата верига, могат да се изтъкнат следните негови предимства: 1) дълбоко регулиране чрез честотата; 2) работи като резонансен инвертор с малки комутационни загуби в ключовите прибори; 3) индуктивността Lk е по-малка и благодарение на това, е по-голямо бързодействието на управлението и защитата; 4) паразитните индуктивности се сумират директно с индуктивността на индуктора; 5) при изпълнение с MOSFET или IGBT се използват собствените обратни диоди; 6) изправителят (постояннотоковият източник) е възможно да бъде нерегулируем.

Напрежението върху товара в АИ с последователен трептящ кръг се получава високо, толкова по-високо, колкото е по-малък факторът на мощността на индуктора. При нискоомни индуктори се използва понижаваш съгласуващ трансформатор, при високоомните индуктори включването им е директно.

Съгласуващите трансформатори имат регулируем коефициент на трансформация и се отличават със специфична малогабаритна конструкция. Може да се твърди, че последователният трептящ кръг и регулируемият съгласуващ трансформатор правят инвертора дълбокорегулируем с универсално приложение.

Интересни съгласуващи възможности се получават, когато АИ в преобразувателя е последователно-паралелен или само паралелен, но работи в режим на резонансен инвертор.

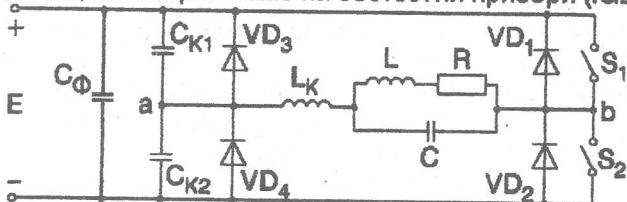
Освен описаната тенденция за използване на последователния трептящ кръг в съвременните широкодиапазонни преобразуватели за електротермията, могат да се посочат някои алтернативни решения.

1) У нас, и по-конкретно, в ТУ-Габрово се разработват преобразуватели със същите възможности, но на основата на инвертори с дозиране на енергията (фиг.3). В тези инвертори мощността и енергията се предават от постояннотоковия източник към товара чрез кондензатор с определен капацитет  $C_k$ . Мощността на инвертора от фиг.3 е равна

$$P = E^2 f C_k = \frac{U_{ref}^2 \cos^2 \varphi}{R} = EI_0 = const$$

Където E и  $I_0$  са съответно захранващото напрежение и входен ток на АИ, f-работната честота на инвертора,  $U_{ref}$  - ефективна стойност на напрежението на товара, cos $\varphi$ -фактор на мощността на товара,  $C_k = C_{k1} + C_{k2}$ . Както е ясно от горното съотношение, мощността не зависи от параметрите на товара, т. е. инверторът притежава свойството естествено да се самосъгласува. Все пак е необходимо да се спазят някои условия, свързани с фазовите

съотношения в променливотоковата верига на инвертора, но те са дефинирани еднозначно и са лесно изпълними с една PLL управляваща система. При реализацията на инвертора като резонансен, токът на вкаючване и изключване на ключовите прибори е равен на нула. За много приложения на индукционното нагряване не е нужен трансформатор. Ако все пак не е възможно да се избегне, трансформаторът може да е нерегулируем. В настоящия момент са реализирани преобразуватели с мощност до 30 kW и честота  $f=10-50$  kHz [4]. Товарът може да бъде практически всяка какъв. Предвидено е универсално използване на преобразувателите. Получаването на по-големи мощности не изисква нови изследвания, а е въпрос само на съответни прибори (IGBT).



фиг.3

2) Широк диапазон от товари може да се захрани и от последователно - паралелен РИ без ОД, работещ в режим на прекъснат ток с определена пауза то. Достатъчно е добре да се проектира, като оптимално се подбере началното му състояние и да се снабди с подходяща система за автоматично регулиране. Твърденията за възможностите на този инвертор могат да се докажат с разработения от катедра ETME при ТУ - Габрово и фирма "ВОП, Вацов и сие" - Ботевград преобразувател за вграждане в индукционна топилна уредба за нуждите на стоматологията, която успешно работи при промяна на количеството на метала в индукционната пещ в границите 2- 90 g [5].

Още по-добри резултати се получават, ако РИ има същата конфигурация на схемата, но е с обратни диоди. В случая работейки в два от възможните режими с естественно и принудително изключване на ключовите прибори, може така да се оразмери инвертора, че без или с минимално регулиране да се покрие диапазона от товари при топене на различни по количество и вид на металите.

3) Едноключовите инвертори имат големи функционални възможности, които не отстъпват на инверторите с полумостова или мостова схема. При тях, чрез съответно по продължителност, превключване на ключов прибор, се предава в товарния трептящ кръг регулируема мощност. Честотата на превключване на КП е равна, два или три пъти по-малка от резонансната честота на кръга. Това са различните модификации на едноключовите РИ с ударно действие, възбуджащи товарния трептящ кръг.

За относително маломощни ТЗИ - до 5 kW, тези преобразуватели могат да бъдат без конкуренция от гледна точка на простотата на сило-

вата и управляващата схеми, и достатъчно широките регулировъчни възможности. За бижутери, занаятчи, зъботехници и др. това са най-подходящите по цена и приложимост преобразуватели. Достиженията в нашата страна в момента са мощност до 3 kW и честота до 120 kHz. Ако в тях се снабди индукционната пещ с магнитопроводи, например от типа "Fluxtrol", би могъл да се направи не оптималния, а може да се каже, идеалния ТЗИ за малки мощности.

Важен аспект на развитието в разглежданата област са въпросите на анализа и проектирането на преобразувателите [1]. Появиха се нови теоретични и програмни продукти. За симулация (компютърен експеримент) на проектирани АИ се наложи програмната система SPICE с различните и версии. Това позволява в много голяма степен да се съкрати процеса на изследване, разработката и усвояването на новите ТЗИ.

В помощ на обучаващите се и специалистите може да бъде и накърно излязлата книга "Автономни инвертори" [1]. В нея са обхванати всички АИТ и РИ с и без ОД, т. е. цялото разнообразие от АИ, използвани в електротермията. Чрез подходящ анализ-един вариант на хармоничния анализ и чрез целево разработения метод на квазиграницния режим на работа на РИ с ОД, са представени като една обща група всички АИТ и РИ. Проектирането им е извършено по единна методика - физически нагледно, с относително прости изчислителни съотношения и за целия комплекс от схеми, режими и товари и е потвърдено с компютърен и реален експеримент.

В настоящата работа не са отразени тенденциите и особеностите, свързани със системите за управление, автоматично регулиране, защита и диагностика на ТЗИ. Те също са съобразени с новата елементна база - MOSFET и IGBT, и технологичните и експлоатационни изисквания към ТЗИ. Тук може да се говори за цял комплекс от взаимно свързани технически решения, най-важните от които са за драйверите и токозахранването на системите за управление, защита по ток и напрежение на приборите, използването на подходящи многофункционални интегрални схеми и стандартни контролери.

В заключение може да се каже, че са налице радикални тенденции в развитието на ТЗИ за УИН и практически резултати, потвърждаващи тяхната прогресивност.

Създава се и навлиза при потребителите ново поколение преобразуватели за електротермията. Всички производители на уредби за индукционно нагряване, могат да запазят своите пазарни позиции, ако синхронизират своето развитие с тези наложили се вече тенденции.

#### Литература:

1. Тодоров Т.С., Н.Д.Маджаров, Д.Т.Алексиев, П.Т.Иванов, „Автономни инвертори“, Габрово, 1996
2. Don L. Lovies, Ray L. Cook, V. Roudnev. Power suplies For Modern Induction Heat Treating. Proceeding of 6-th International Induction Heating Seminar, 13-15 September, 1995, Nashville, TN.

3. Маджаров Н.Д., Мостов автономен инвертор с дозиране на енергията. Сборник доклади научно-приложна конференция ET'96, Созопол 1996

4. Маджаров Н.Д., Ненов Н.Х., Методика за проектиране на мостов резонансен инвертор с дозиране на енергията. Сборник доклади научно-приложна конференция ET'96, Созопол 1996

5. Иванов П.Т., Алексиев Д.Т., Високочестотна с MOS-транзистори индукционна топлива топлива уредба за стоматологията. Сборник доклади научно-приложна конференция ET'96, Созопол 1996

6. Проспектни материали на фирмите: INDUCTOTERM, INDUCTONEAT, ELVA, LEPEL, ECCO, PILLAR, TOSHIBA, ELIN UNION, AEG, SIEMENS, BBC, TOCCO STEL, ASEA, ELFIAK, RADYNE и др., 1985-1996; "Мехатроника"-Габрово, 1980-1996.

7. The European Market for high Power Semiconductor, 1995.