

## ЕНЕРГИЙНА ЕФЕКТИВНОСТ НА ИНВЕРТОРЕН ИЗТОЧНИК ЗА ИНДУКЦИОННО НАГРЯВАНЕ НА ФЛУИДИ

Даниела Марева  
Димитър Юдов  
Бургаски свободен университет  
ЦИТН

## ENERGY EFFICIENCY OF SOURCE INVERTER FOR INDUCTION HEATING OF FLUIDS

Daniela MAREVA  
Dimitar YUDOV  
Burgas Free University  
Department CITN  
e-mail: d\_mareva@abv.bg

***Абстракт:** Разгледана е схема на инвертор за нагряване на флуиди с комбинирана структура, подобряваща работата на инвертора, използвайки преимуществата на инвертор по ток и напрежение. При доказана функционалност на изследваната схема в широк диапазон на изменение на изходната мощност с висок коефициент на полезно действие са разгледани загубите в изправителя и инвертора в номинален режим.*

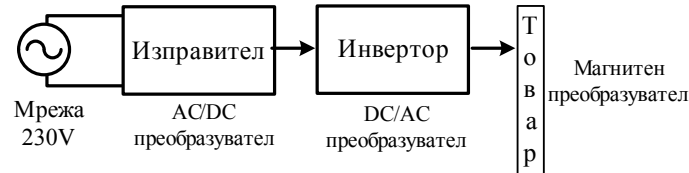
***Ключови думи:** Индукционно нагряване, PSPICE анализ, резонансен инвертор, загубна мощност*

***Abstract:** Considered is a schematic of an inverter for heating fluids with combined structure that improves the inverter using the advantages of inverter current and voltage. When proven functionality of the studied scheme in a wide range of variation of output power with high efficiency are discussed losses in the rectifier and inverter in nominal mode.*

***Key words:** induction heating of fluids, PSPICE analysis, resonance inverter, power loss*

Индукционното нагряване на течности намира все по-широко приложение в бита и индустрията. При индукционните бойлери поради необходимост от голяма мощност се прилагат двутактните схеми [2,4], като основният преобразувател на енергия са високочестотни мощни транзисторни инвертори с използване на мощни MOSFET или IGBT.

На фиг.1 е показана блоковата схема на широко използваната система за индукционно нагряване на флуиди.



Фиг. 1. Блокова схема

Основните два блока, от които е изградена тази система са:

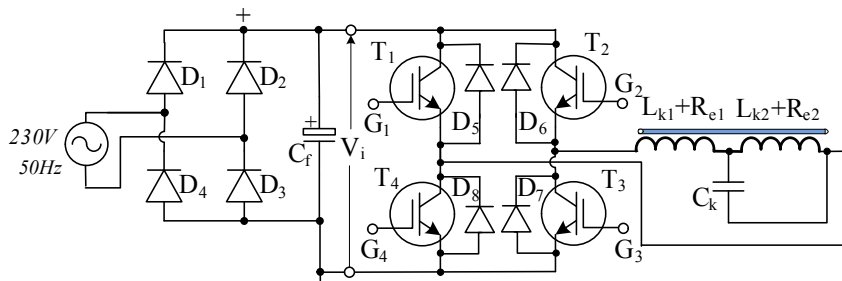
- Изправител – схема „Грец“ ( $D_1 \div D_4$ ), преобразуващ променливото мрежово напрежение в постоянно. Включва в себе си и изглаждащия филтров кондензатор  $C_f$ , който може да бъде с малка стойност, поради спецификата на схемата;

- Инвертор – преобразува постоянното напрежение след изправителя в променливо с повишени енергийни параметри. Той е изграден по схема-мостови резонансен инвертор, в чийто диагонал е свързан товара.

За товар се използва индуктор, състоящ се от топлообменник и бобина в две секции, навита около него. Разделя се условно на 2 части: последователна индуктивност ( $L_{k1}$ ), паралелна индуктивност ( $L_{k2}$ ) върху общ магнитопровод – тръба, нямащи магнитна връзка помежду си. Съпротивленията  $R_{e1}$  и  $R_{e2}$  отразяват активните загуби от токовете на Фуко в магнитопровода. Заедно двете индуктивности  $L_{k1}$  и  $L_{k2}$  с паралелния кондензатор ( $C_k$ ) определят резонансната честота в товара на мостовия инвертор.

Целта на настоящата разработка е да се изследват загубите в различните блокове на системата и се докаже, къде се получават основните загуби и намаляването им.

Принципната схема на система за индукционно нагряване на флуиди има вида фиг.2:



Фиг. 2. Пълна принципна схема на системата

### I. Разглеждане на общите загуби на цялата система

Загубите не са еднакви, за това е целесъобразно да се разглеждат поотделно.

Общият вид на загубите в цялата система има вида:

$$P_{z\Sigma} = P_{zD} + P_{zT} + P_{zL} \quad (1)$$

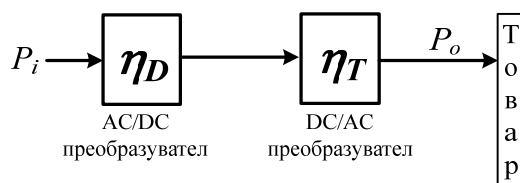
където:  $P_{z\Sigma}$  – пълните загуби в системата;

$P_{zD}$  – загуби в диодите на изправителя;

$P_{zT}$  – загуби в силовите ключове;

$P_{zL}$  – загуби в магнитния преобразувател- индуктор;

Разглеждане на загубите в отделните блокове.



Фиг. 3. Блокова схема на формиране на загубите

$$\eta_{\Sigma} = \frac{P_0}{P_i} \quad (2)$$

$$\eta_{\Sigma} = \eta_D \cdot \eta_T \quad (3)$$

## II. Изследване на токоизправителя

В най-общия случай източникът на постоянно напрежение се захранва от мрежа 230 V/50Hz с безтрансформаторен токоизправител и филтър.

$$P_G = \frac{P_0}{0,8} \quad (4)$$

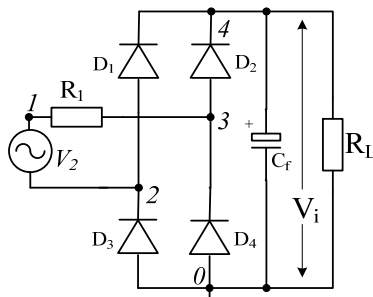
$$P_i = P_G + P_{zD} \quad (5)$$

където:  $P_G$  – мощността на изправителя;

$P_i$  – входна мощност, консумирана от мрежата на входа на изправителя;

$P_0$  – изходна мощност, отделена в товара;

$P_{zD}$  – загубната мощност в изправителните диоди.



Фиг. 4. Pspice модел на изправителя

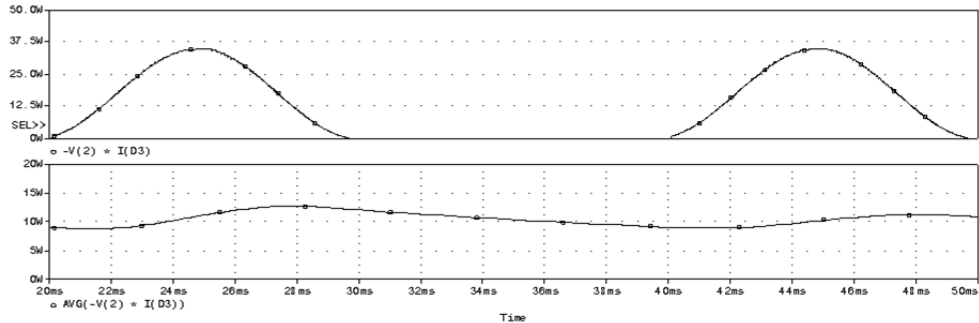
Стойността на тока  $I_o$  през инвертора е 55A[1]. Стойността на входното съпротивление от инвертора  $R_L$ , което е товар на изправителя и се изчислява:

$$R_L = \frac{P_0 + 2 \cdot P_{zmT}}{(I_o)^2} = \frac{6 \cdot 10^3 + 2 \cdot 100}{(55)^2} = 2,1 \Omega \quad (6)$$

1. Изследване на изправителя при избрани диоди с промяна на захранващото напрежение (170, 200, 230V)

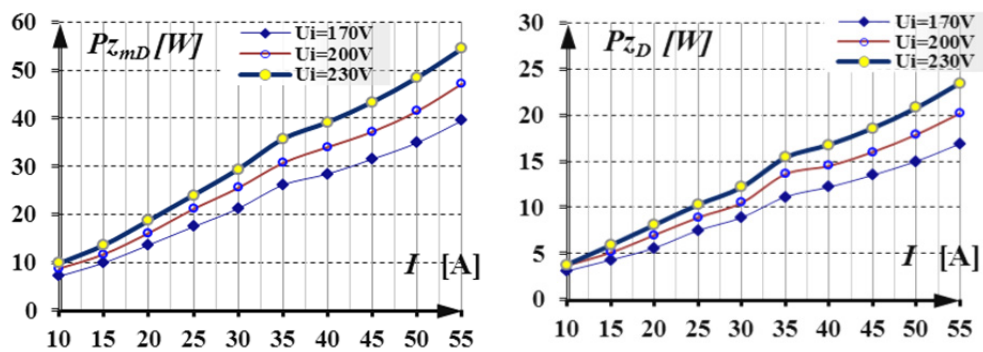
Резисторът  $R_1$  характеризира активните загуби в силовата верига на съединителните проводници и вътрешното съпротивление на източника на захранване.

На фигура 5 са показани максималната стойност на загубната мощност  $P_{ZmD}$  и средната стойност на изменение на загубната мощност  $P_{ZD}$  в диод от изправителя.

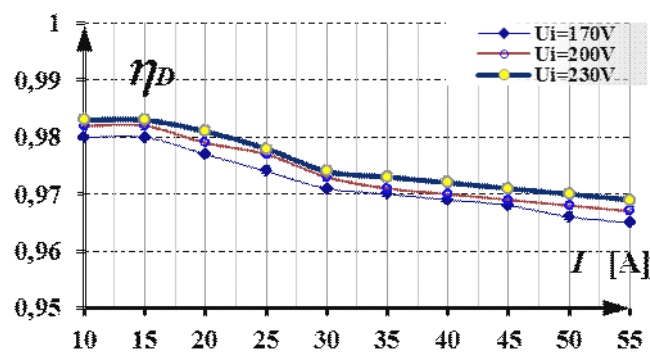


Фиг. 5. Времедиаграми на максимална и средна стойност на изменение на загубната мощност в диод

На фиг. 6 са показани диаграмите на максималната и средната стойност на загубната мощност в диод от изправителя в зависимост от изходния ток, а на фиг. 7 коэффициентът на полезно действие на работа на изправителя при три различни стойности на захранващото напрежение.



Фиг. 6. Диаграми на максималната и средната загубни мощности в диод в зависимост от изходния ток



Фиг. 7. Диаграма на коэффициента на полезно действие на изправителя в зависимост от изходния ток

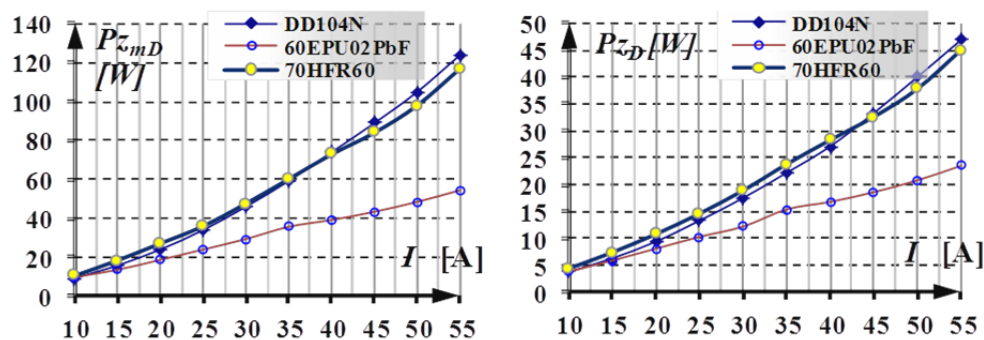
2. Изследване на загубите при различни по параметри диоди

В таблица 1 са показани основните параметри на диодите, участващи в изследвания изправител. За да се направи сравнителния анализ се използват диоди с подобни параметри.

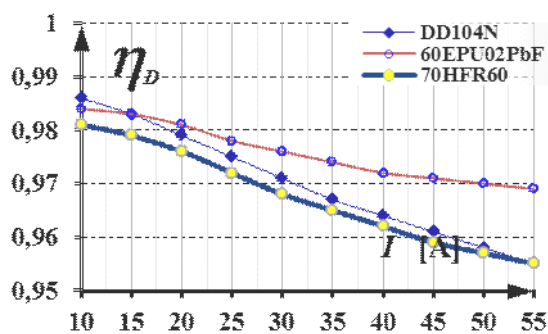
Табл.1.

DIODE	model	VR	IF(AV)	IFRM	VF	RthJC	rT
		V	A	A	V	K/W	mΩ
1	DD104N	1200	104	250	0,7	0,19	2,5
2	60EPU02PbF	400	60	600	0,87	0,7	1,45
3	70HFR60	420	70	350	1,2	0,75	3,4

На фиг. 8 са показани диаграмите на максималната и средната стойност на загубната мощност в диод от изправителя в зависимост от изходния ток, а на фиг. 9 коефициентът на полезно действие при работа на изправителя с използване на три различни по параметри изправителни диоди, изграждащи изправителя.



Фиг. 8. Диаграми на максималната и средната загубни мощности в диод на изправителя в зависимост от изходния ток



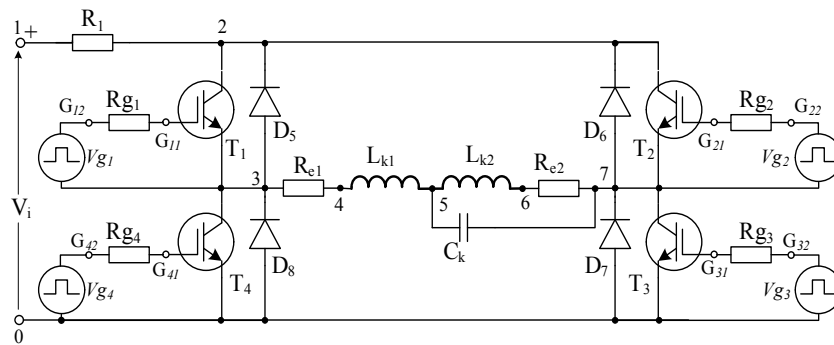
Фиг. 9. Диаграма на коефициента на полезно действие на изправителя в зависимост от изходния ток

Могат да се направят следните заключения:

1. В токоизправителя основните загуби са в диодите.
2. Коефициентът на полезно действие при диодните токоизправители е в обхвата от 0,96 до 0,98, което се приема като висок коефициента на полезно действие при преобразувателите.

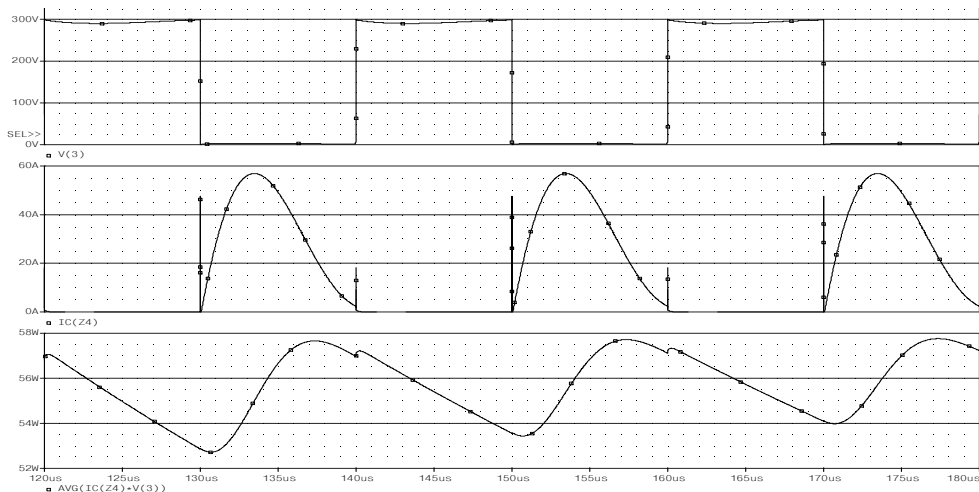
### III. Анализ на (DC/AC) резонансният инвертор за индукционно нагряване на флуиди

На фиг. 10. е показан PSpice модел на изследвания (DC/AC преобразувател) инвертор за индукционно нагряване на флуиди [2]. Резонансният мостов инвертор се захранва с изправеното от мрежата напрежение  $V_i$ . Индукторът се разделя условно на 2 части: последователна индуктивност ( $L_{k1}$ ), паралелна индуктивност ( $L_{k2}$ ). Те са върху общ магнитопровод – тръба, но нямат магнитна връзка помежду си. Съпротивленията  $R_{e1}$  и  $R_{e2}$  отразяват активните загуби от токовете на Фуко в магнитопровода. Заедно двете индуктивности  $L_{k1}$  и  $L_{k2}$  с паралелния кондензатор ( $C_k$ ) определят резонансната честота в товара на мостовия инвертор. Резисторът  $R_1$  характеризира активните загуби в силовата верига на съединителните проводници и вътрешното съпротивление на източника на захранване.



Фиг. 10. Pspice модел на инвертора

На фиг. 11 са показани времедиаграми на напрежението и тока в един от транзисторите, изграждащ моста на резонансният инвертор и средната стойност на загубната мощност в него при 100% натоварване при номинален режим на работа.



Фиг. 11. Времедиаграми на напреженията, токовете и средната стойност на загубната мощност в транзистор

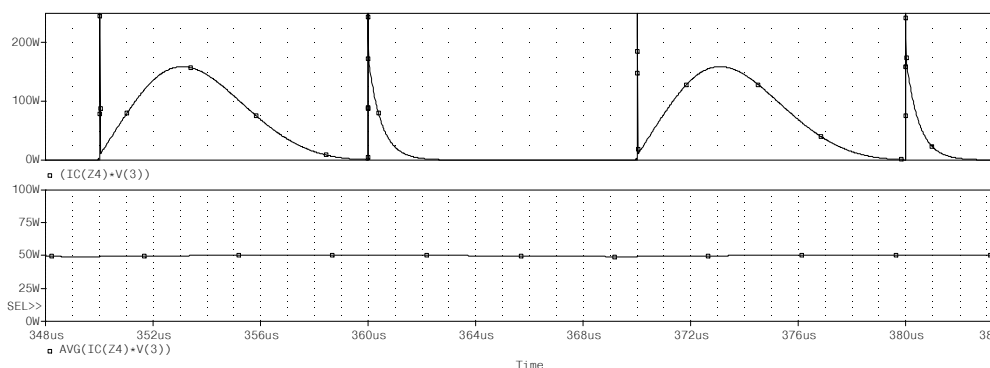
Параметрите на инвертора при номинален режим за постигане на изходна мощност  $P_o=6kW$  са:  $V_I=300V$ ;  $R_I=0.1\Omega$ ;  $L_{k1}=18\mu H$ ;  $R_{L1}=3,5\Omega$ ;  $L_{k2}=26\mu H$ ;  $R_{L2}=4\Omega$ ;  $C_k=0,67\mu F$ ;  $f=50kHz$  [1]

В инверторите използвани в практиката за индукционно нагряване на флуиди се използват мощни силови ключове на базата на MOSFETs или IGBTs транзистори. При симулацията се изследва схемата с два различни типа силови ключове и от всеки вид се сравняват три с различни параметри. В таблица 2 са показани основните параметри на IGBT транзистори, участващи в изследвания мостови резонансен инвертор.

Табл. 2

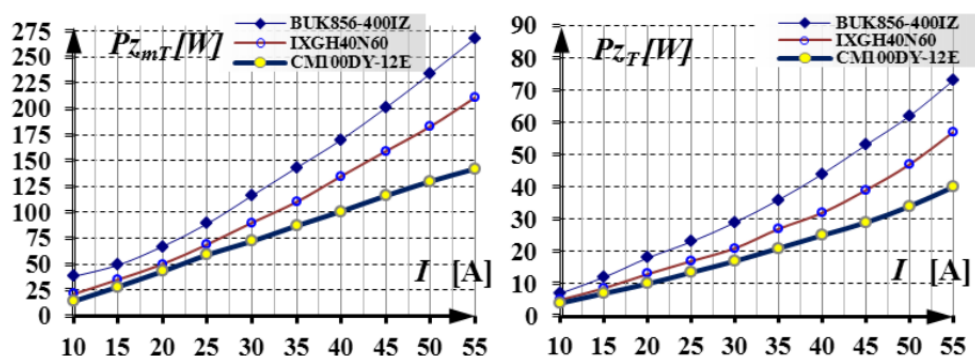
T	IGBT	Vdss/ces	Ic40	Vce(sat)	trr/tri	Ciss/Cies	Coss/Coes	Crss/Cres	Qg	
		V	A	V	$\mu s$	nF	pF	pF	nC	
1	BUK856-400IZ	500	20	2.2	12	1.2	130	50	125	
2	IXGH40N60	HyperFast	600	75	2.5	2	4.5	300	60	200
3	CM100DY-12E	H seria	600	100	2.15	0.3	10	350	200	300

На фиг. 12 са показани максималната стойност на загубната мощност  $P_{ZmT}$  и средната стойност на изменение на загубната мощност  $P_{ZT}$  в транзистора.

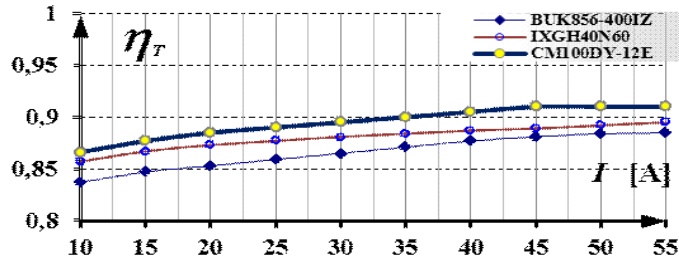


Фиг. 12. Времедиаграми на максимална и средна стойност на загубната мощност в транзистор

На фиг.13 са показани диаграмите на максималната и средната стойност на изменение на загубната мощност в инвертора при три различни вида IGBT транзистори, а на фиг.14 коефициентът на полезно действие при работа на мостовия резонансен инвертор при използване на тези транзистори.



Фиг. 13. Диаграми на максималната и средна загубни мощности в IGBT транзистора



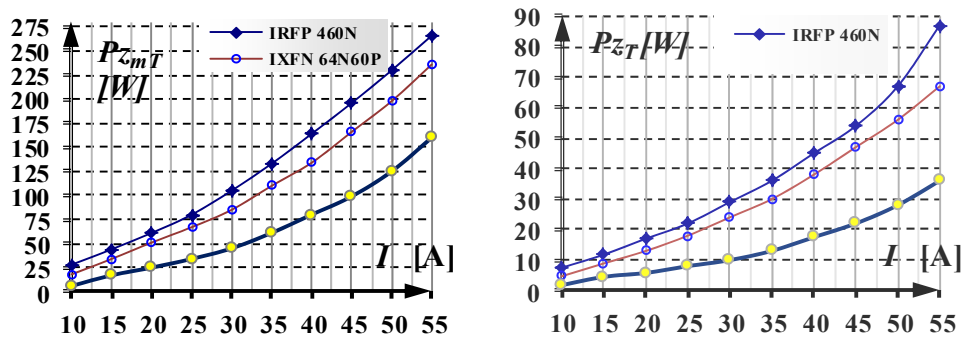
Фиг. 14. Диаграма на коефициента на полезно действие на инвертора с IGBT в зависимост от изходния ток

В таблица 3 са показани основните параметри на MOSFET транзистори, участващи в изследвания мостови резонансен инвертор.

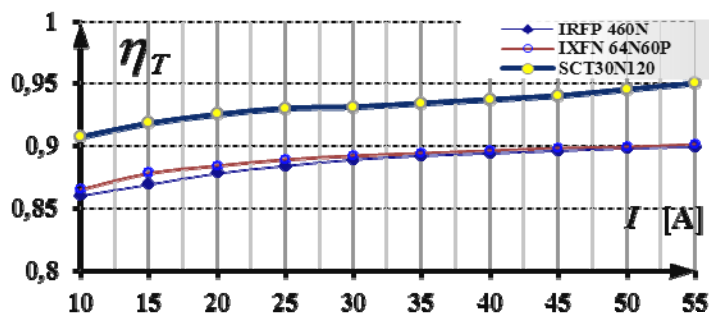
Табл. 3

Т	MOSFET		Vdss/ces	Ic40	Rds(on)	trr/tri	Ciss/Cies	Coss/Coes	Crss/Cres	Qg
			V	A	m $\Omega$	ns	nF	pF	pF	nC
1	IRFP 460N	FET	500	20	270	260	4,2	870	350	210
2	IXFN 64N60P	FET-UF	600	65	96	200	12	1150	80	200
3	SCT30N120	FET-SiC	1200	45	90	20	1,7	130	25	105

На фиг.15 са показани диаграмите на максималната и средната стойност на изменение на загубната мощност в инвертора при трите различни вида MOSFET транзистори, а на фиг.16 коефициентът на полезно действие при работа на мостовия резонансен инвертор при използване на тези транзистори.



Фиг. 15. Диаграми на максималната и средната стойност на загубни мощност с MOSFET в зависимост от изходния ток

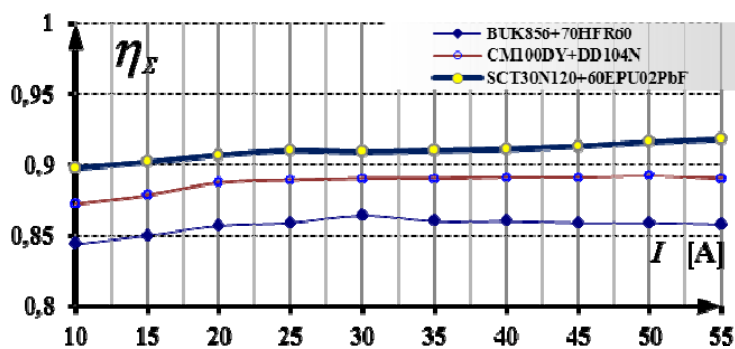


Фиг. 16. Диаграма на коефициента на полезно действие на инвертора с MOSFET в зависимост от изходния ток

Могат да се направят следните заключения:

1. В резонансния инвертор основните загуби са в транзисторите на мостовия инвертор.
2. Коефициентът на полезно действие при транзисторния резонансен инвертор е в обхвата от 0,90 до 0,93. При двойното сравнение по отношение на транзисторите най-висок коефициент на полезно действие се получава с използването на MOSFET-SiC, като разликата с другите видове е до около 5%.

Общият коефициент на полезно действие на цялата система е изобразен на фиг.17. Получава се при умножение на коефициентите на полезно действие на изправителя с този на инвертора. Сравнени са изправител и инвертор с IGBT, които са с обикновени параметри, вариантна комбинация със средни параметри и комбинация с диоди и MOSFET-SiC с подобрени параметри.



Фиг. 17. Диаграма на сумарния коефициент на полезно действие в системата

Наблюдава се, че графиките на коефициентите на полезно действие се компенсират за изправител-инвертор и резултантната крива за всяка комбинация е почти линейна. Най-висок коефициент на полезно действие се получава при диоди и MOSFET-SiC транзистор с много добри параметри и е 5% по-висок от първия.



## ИЗВОДИ

1. Поради различните характеристики на изменение на коефициентите на полезно действие на изправителя и инвертора, общият коефициент на полезно действие слабо зависи от изменението на тока.

2. Благодарение на избраната безтрансформаторна силова схема, общият коефициент на полезно действие е около 0,9. Това показва добра работа на системата за индукционно нагряване на флуиди, използваща комбинирания товар.

## Литература

1. Mareva D.J., Yudov D.D., Marev E. M. „Simulation research of Serial and LLC Resonant Inverters for Induction Heating of Fluids” – The XXII International conference „ELECTRONICS ET’2013”, Sozopol 2013, Annual journal of Electronics, 2013, volume 7, ISSN 1314-0078, p.148
2. Mareva D.J., Yudov D.D., Marev E. M. „Simulation research of Serial and LLC Resonant Inverters for Induction Heating of Fluids” ANNUALJOURNALOFELECTRONICS-2013, SOZOPOL, 2013, ISSN 1314-0078
3. Mareva D.J., D.D. Yudov, E.M. Marev „Inverter for Induction Heating of Fluids” – The XIX International conference „ELECTRONICS ET’2010”, Sozopol 2010, b1, p204
4. Mareva D.J., Yudov D.D., Marev E. M. „Single-Ended Inverters For Induction Heating Of Fluids” - XVIII-th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies SIELA 2014, 29-31 May 2014, Bourgas, Bulgaria, p.69
5. Georgiev A. Sl. ‘Bridge Systems and their Reliability Analysis’. International Scientific Journal „Acta Universitatis Pontica Euxinus” published by aegis of Tehnical University of Varna – Bulgaria and Ovidius University of Constanta – Romania, ISSN 1312-1669, Volume 1, Number 1, 2002 pp. 108-113
6. V. C. Valchev, T. P. Todorova, P. V. Yankov and A. Van den Bossche, Design Considerations and Loss Analysis of DC Chokes, *IEEE SIELA2016*, 29 May - 2 June, 2016, Bourgas.