

ЕНЕРГИЙНА ЕФЕКТИВНОСТ НА ИНВЕРТОРЕН ИЗТОЧНИК ЗА ИНДУКЦИОННО НАГРЯВАНЕ НА ФЛУИДИ

Даниела Марева Димитър Юдов
Бургаски Свободен Университет, ЦИТН, 8000 Бургас, България

ENERGY EFFICIENCY OF SOURCE INVERTER FOR INDUCTION HEATING OF FLUIDS

Daniela MAREVA Dimitar YUDOV
Burgas Free University, Department CITN, 8000 Burgas, Bulgaria
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.

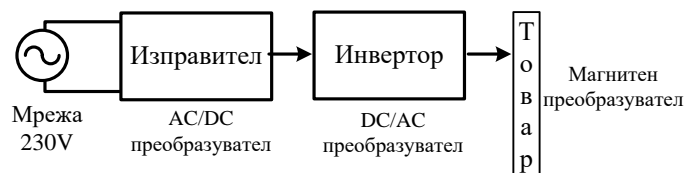
Ключови думи: Индукционно нагряване, PSPICE анализ, резонансен инвертор, загубна мощност

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.

Keywords. 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:

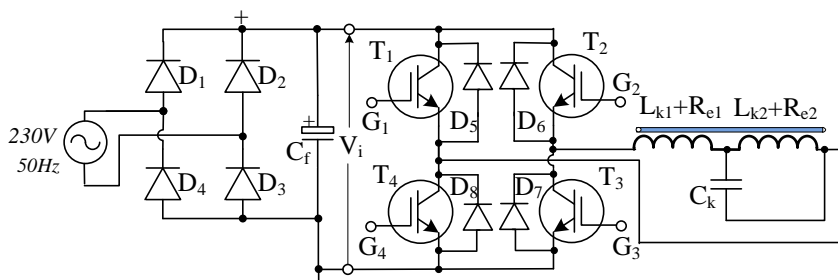
- Изправител - схема „Грец” ($D_1 \div D_4$), преобразуващ променливото мрежово напрежение в постоянно. Включва в себе си и изглаждащия филтров кондензатор C_f , който може да бъде с малка стойност, поради спецификата на схемата;

- 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

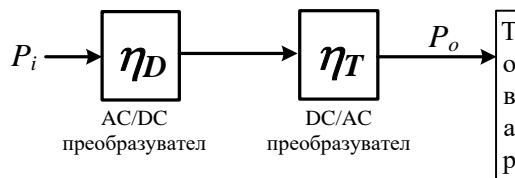
I. Разглеждане на общите загуби на цялата система.

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

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

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

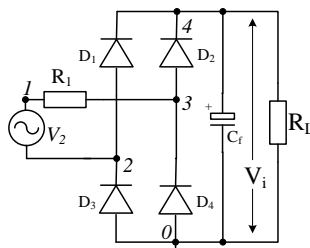
II. Изследване на токоизправителя

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

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

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

- където: P_G – мощността на изправителя;
- P_i – входна мощност, консумирана от мрежата на входа на изправителя;
- P_o – изходна мощност, отделена в товара;
- P_{zD} – загубната мощност в изправителните диоди;



фиг.4. Pspice модел на изправителя

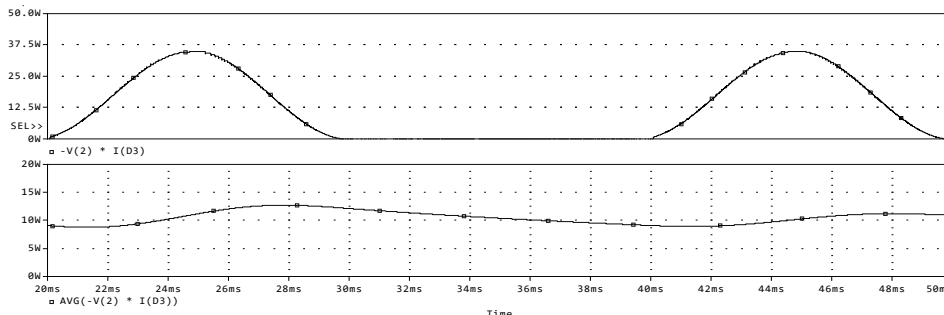
Стойността на тока I_o през инвертора е 55A[1]. Стойността на входното съпротивление от инвертора R_L , което е товар на изправителя и се изчислява:

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

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

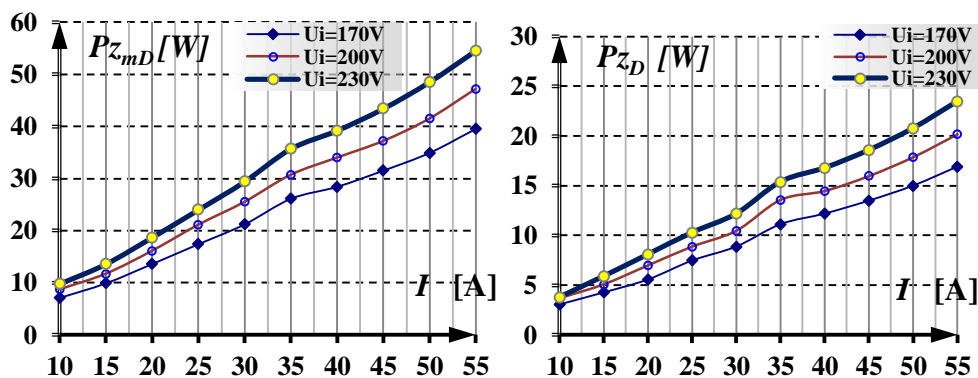
Резисторът R_1 характеризира активните загуби в силовата верига на съединителните проводници и вътрешното съпротивление на източника на захранване.

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.

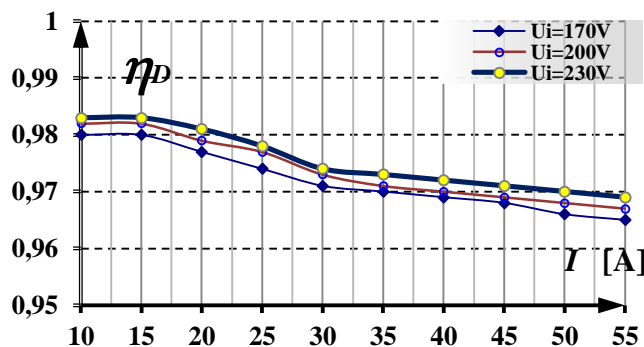


фиг.5. Времени диаграми на максимална и средна стойност на изменение на загубната мощност в диод

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 коефициентът 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 коефициента на полезно действие на изправителя в зависимост от изходния ток

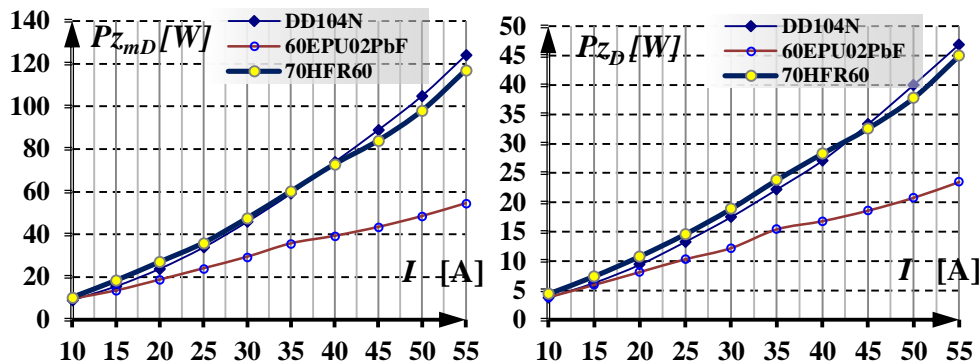
2. Изследване на загубите при различни по параметри диоди

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.

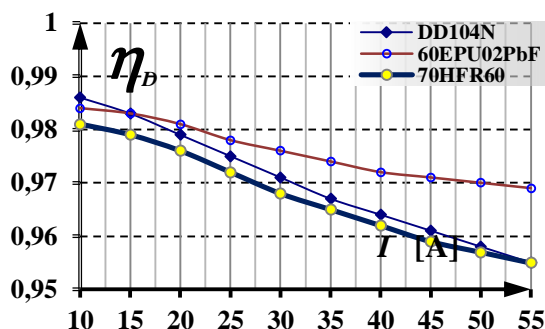
DIODE	model	V_R	$I_{F(AV)}$	I_{FRM}	V_F	R_{thJC}	r_T
		V	A	A	V	K/W	mΩ
1	DD104N	1200	104	250	0,7	0,19	2,5
2	60EPU02PbF	400	60	600	0,87	0,7	1,45
3	70HFR60	420	70	350	1,2	0,75	3,4

табл.1.

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



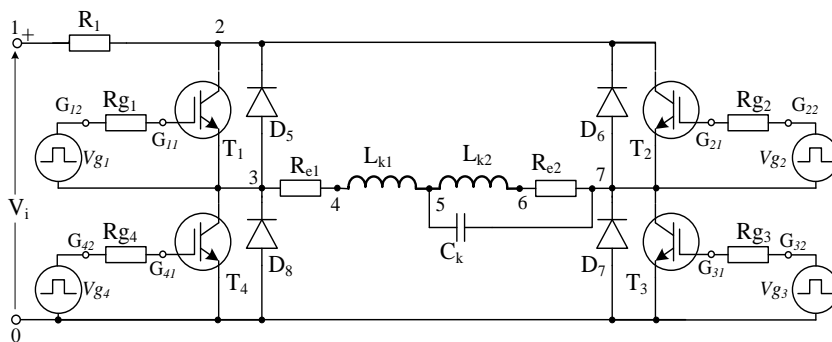
фиг.9. Диаграма на коефициента на полезно действие на изправителя в зависимост от изходния ток

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) резонансния инвертор за индукционно нагряване на флуиди

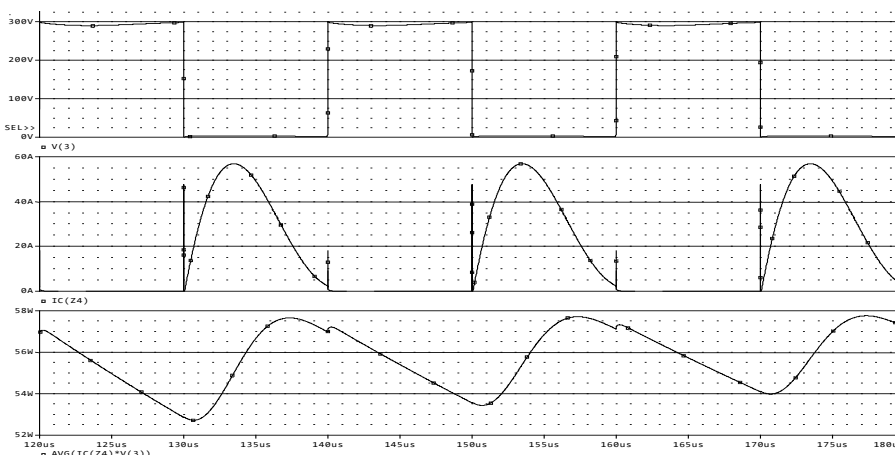
На фиг 10. е показан PSpice модел на изследвания (DC/AC преобразувател) инвертор за индукционно нагряване на флуиди [2]. Резонансния мостови инвертор се захранва с изправеното от мрежата напрежение V_i . Индукторът се разделя условно на 2 части: последователна индуктивност (L_{k1}), паралелна индуктивност (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

Нафиг.11 са показани времедиаграми на напрежението и тока в един от транзисторите, изграждащ моста на резонансия 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

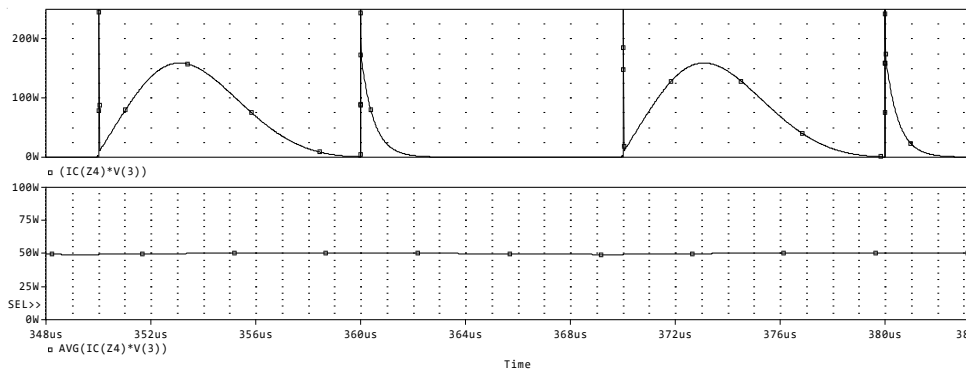
Параметрите на инвертора при номинален режим за постигане на изходна мощност $P_o=6kW$ са: $V_i=300V$, $R_1=0.1\Omega$; $L_{k1}=18\mu H$; $R_{L1}=3.5\Omega$; $L_{k2}=26\mu H$; $R_{L2}=4\Omega$; $C_k=0.67\mu F$; $f=50kHz$ [1]

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.

T	IGBT	Vdss/ces	Ic40	Vce(sat)	ttr/tri	Ciss/Cies	Coss/Coes	Crss/Cres	Qg
		V	A	V	μs	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

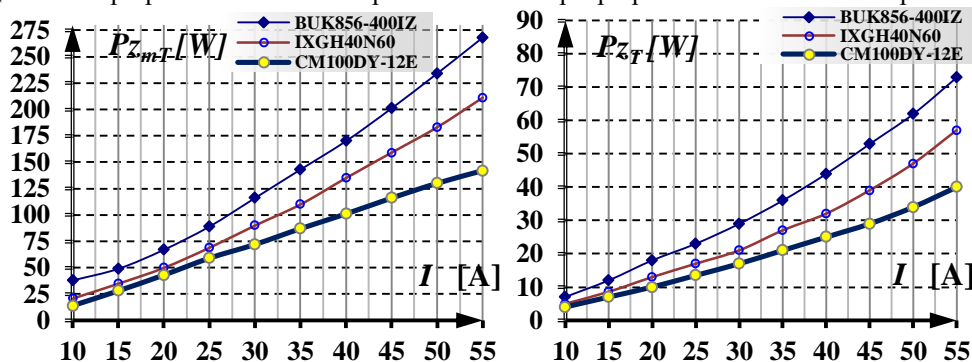
табл.2.

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

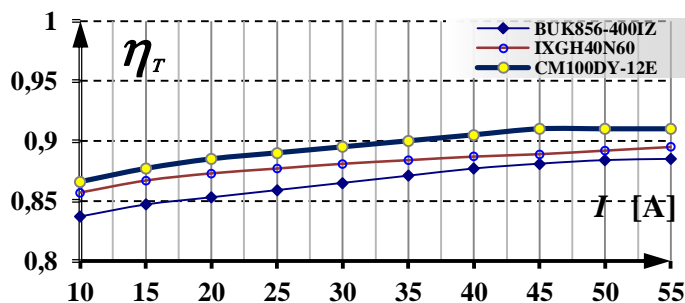


фиг.12. Времедиаграми на максимална и средна стойност на загубната мощност в транзистор

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



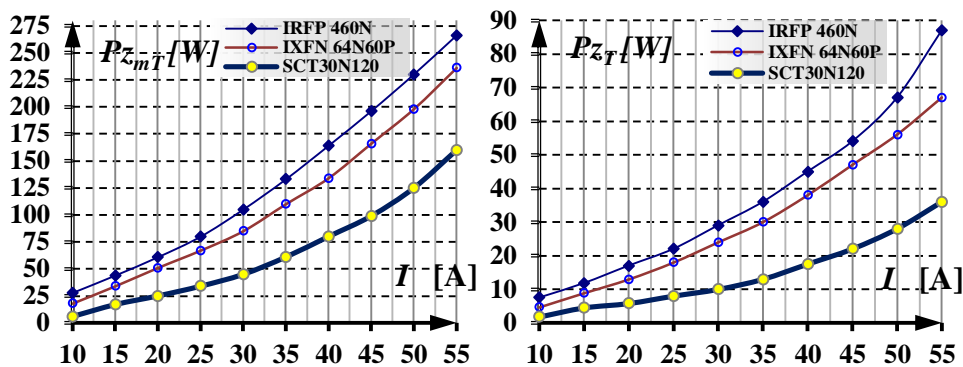
фиг.14. Диаграма на коефициента на полезно действие на инвертора с IGBTв зависимост от изходния ток

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

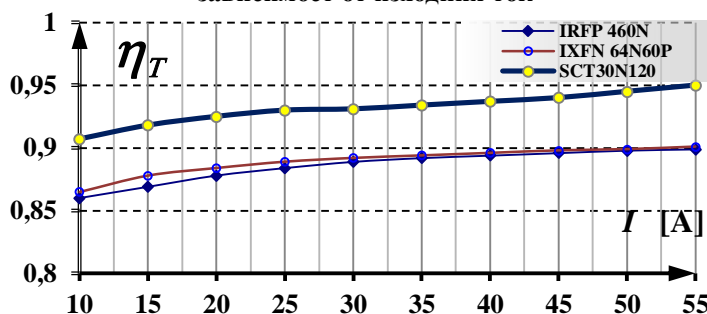
T	MOSFET		V _{dss} /c _{es}	I _{c40}	R _{ds(on)}	t _{rr} /t _{ri}	C _{iss} /C _{ies}	C _{oss} /C _{oes}	C _{rss} /C _{res}	Q _g
			V	A	mΩ	ns	nF	pF	pF	nC
1	IRFP 460N	FET	500	20	270	260	4,2	870	350	210
2	IXFN 64N60P	FET-UF	600	65	96	200	12	1150	80	200
3	SCT30N120	FET-SiC	1200	45	90	20	1,7	130	25	105

табл.3.

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 MOSFETв зависимост от изходния ток

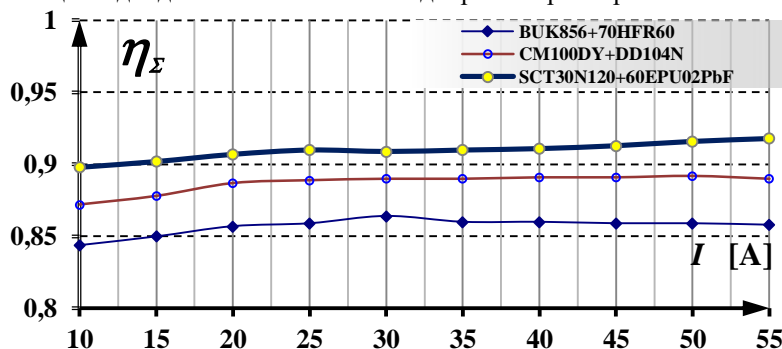


фиг.16. Диаграма на коефициента на полезно действие на инвертора с MOSFETв зависимост от изходния ток

Могат да се направят следните заключения:

1. В резонансният 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” ANNUAL JOURNAL OF ELECTRONICS-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 Technical 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.