

COMPARATIVE ANALYSIS OF FUNCTIONAL AND ECONOMIC PARAMETERS OF IGBT AND MOSFET SWITCHES

Vencislav Valchev, Technical University of Varna, vencivalchev@hotmail.com

Abstract: This paper presents an overview and comparison of the most popular at the moment electronic switches used in power electronics: bipolar transistors with an insulated gate (IGBTs) and field-effect transistors with insulated gate (MOSFETs). The study includes a sample formed from commercially available components and for the period 2008 to 2013 (a total of over 1200 devices). Analyzed and compared are the main functional characteristics of the devices and their development during this period: the maximum current and voltage parameters, switching power losses and cost. The analysis leads to conclusions about the advantages of each of the two types of devices: IGBTs are with more variety, lower cost, lower total losses per unit commutated power; MOSFETs have relatively smaller conduction losses. The accumulated database of over 1200 devices is available at <http://www.tu-varna.bg/tu-varnaetm/images/Research/Valchev/transistor%20data.rar>.

Key words: power switches. IGBT, MOSFET

СРАВНИТЕЛЕН АНАЛИЗ НА ФУНКЦИОНАЛНИТЕ И ИКОНОМИЧЕСКИ ПАРАМЕТРИ IGBT И MOSFET КЛЮЧОВЕ

Венцислав Вълчев, Технически университет Варна, vencivalchev@hotmail.com

Абстракт: Статията представя обзор и сравнение на най-популярните към момента електронни ключове за силовата електроника: биполярните транзистори с изолиран гейт (IGBT) и полевите транзистори с изолиран гейт (MOSFET). Изследването включва представителна извадка, формирана от наличните на пазара компоненти и снета за периода 2008 до 2013 година (общо над 1200 прибора). Анализирани и сравнени са основните функционални характеристики на приборите и тяхното развитие за този период: максимални параметри, комутирана мощност, загуби и цена. От направения анализ са формирани изводи за преобладаващите предимства: IGBT са с по-голямо разнообразие, по-ниска цена, по-малки общите загуби за единица комутирана мощност, а MOSFET със сравнително по-малки загуби от проводимост. Натрупаната база данни за над 1200 прибора е достъпна на интернет адрес: <http://www.tu-varna.bg/tu-varnaetm/images/Research/Valchev/transistor%20data.rar>.

Ключови думи: Силова електроника, електронни ключове, IGBT, MOSFET

ВЪВЕДЕНИЕ

За последните две десетилетия електронната техника бележи изключително голям подем, като развитието става във всички технологични посоки. Една от най-перспективните области на електронната техника е силовата електроника [1]. Съвременните изисквания към силовата електроника са свързани с преобразуването на електрическата енергия при минимални размери и ефективност на устройството чрез промяна на параметрите ток, напрежение, честота. Основен инструмент на силовата електроника са електронните ключове. Съвременната компонентна база включва

редица прибори като: неуправляеми ключове - диоди; частично управляеми ключове - тиристоры, симисторы; напълно управляеми ключове - биполярни транзистор (BJT), полеви транзисторы с р-п преход (JFET), IGBT, MOSFET и др. В голямата си част съвременните електронни ключове се произвеждат на база на силиций (Si), актуално е развитието на технологии включват силициев карбид (SiC) и галиев нитрид (GaN).

Най-популярни и достъпни при изграждане на силови електронни устройства към момента са IGBT и MOSFET ключовете. На пазара съществуват редица наложили се производители, които предлагат значително количество прибори с различни параметри [2]. Това дава възможност за гъвкав дизайн и позволява при проектиране на силови електронни устройства подбора на ключовете да става при избор от голямо множество прибори. Едновременно се появяват въпроси свързани с правилния избор на прибори, което поради голямото разнообразие често може да бъде сравнително трудна задача [3],[4],[5].

Отчитайко тези въпроси, настоящата публикация си поставя за цел да направи кратък обобщен и сравнителен анализ на технологичното състояние на електронните прибори IGBT и MOSFET. Анализът проследява развитието на приборите за интервал от 5 години, като в същото време ги сравнява по техните основни параметри и характеристики свързани с максимално допустимите им натоварвания, оценка на загубите в приборите, като и икономически аспекти.

ПРЕДСТАВИТЕЛНА ИЗВАДКА и АНАЛИЗИРАНИ ПАРАМЕТРИ

Представителната извадка, на която се базира по-нататъшния анализ, е изготвена като са записани параметрите характеризиращи общо: 306 MOSFET и 205 IGBT актуални към 2008 година; 355 MOSFET и 332 IGBT актуални към 2013 година. Множеството е съставено, като са подбрани комерсиално налични и достъпни компоненти. Разглеждат се прибори произведени от над 10 компании. Ограничителните условия при подбора на компоненти са: максималният среден ток през ключа да бъде над 1А. За да може да бъде направено адекватно сравнение между MOSFET и IGBT напреженовият диапазон на транзисторите включва компоненти с напрежения, равни и по-големи от 600V (IGBT за по ниски напрежения не се произвеждат); от анализа се изключват електронни компоненти в модулна реализация - разглеждат се само дискретни компоненти. Анализираниите параметрите за всеки компонент, съответно за IGBT и MOSFET са показани и пояснени на табл. 1.

MOSFET	IGBT	Параметър
$V_{DS}[V]$	$V_{CE}[V]$	Максимално обратно напрежение върху прибора
$I_D[A]$	$I_C[A]$	Максимален среден ток през прибора
-	$V_{CE(on)}[V]$	Пад на напрежение върху прибора при насищане
$R_{DS(on)}[\Omega]$	-	Съпротивление на прехода при насищане на прибора
-	$E_{total}[mJ]$	Общата енергия отделена при комутация. Включва и енергията, необходима за обратното възстановяване на антипаралелния диод, ако такъв е включен в прибора.
$t_r[ns], t_{on}[ns], t_f[ns], t_{off}[ns]$	-	Времената характеризиращи процеса на включване и изключване на прибора
$t_{rr}[ns], Q_{rr}[\mu C], I_{rrm}[A]$	-	Времето, заряда и максималният ток при обратно възстановяване на паразитния антипаралелен диод в конструкцията на MOSFET
Цена [€]	Цена [€]	цената на прибора в евро (EUR) за един брой

Табл. 1. Параметри обект на анализ за разглежданото множество от прибори

Съставената база данни използвана за по-нататъшния анализ е достъпна и предоставена за свободно ползване на интернет адрес: <http://www.tu-varna.bg/tu-varnaetm/images/Research/Valchev/transistor%20data.rar>

АНАЛИЗ НА ПАРАМЕТРИТЕ ОПРЕДЕЛЯЩИ МАКСИМАЛНАТА ВЪЗМОЖНА КОМУТИРАНА МОЩНОСТ

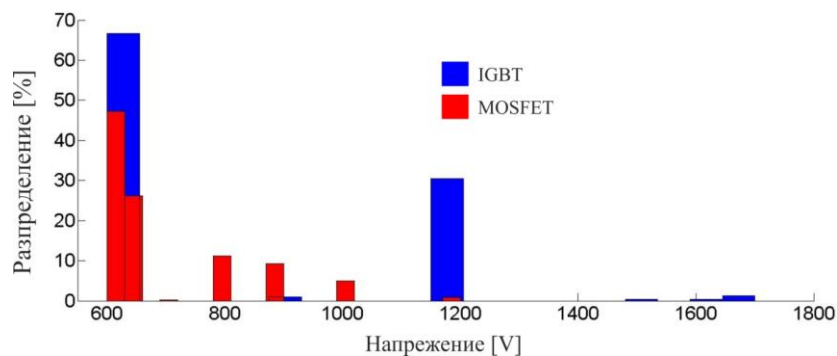
Допустими максимални параметри на приборите са праговите напрежения и токове, с които те може да бъдат натоварени. Тези величини съответно определят и максималната възможна комутирана мощност от прибора. Тя може да се изрази като произведение на максималното напрежение върху прибора и максимално допустимия среден ток, съответно израз (1) за MOSFET и израз (2) за IGBT:

$$P_{maxMOSFET} = V_{DSmax} \cdot I_D \quad (1)$$

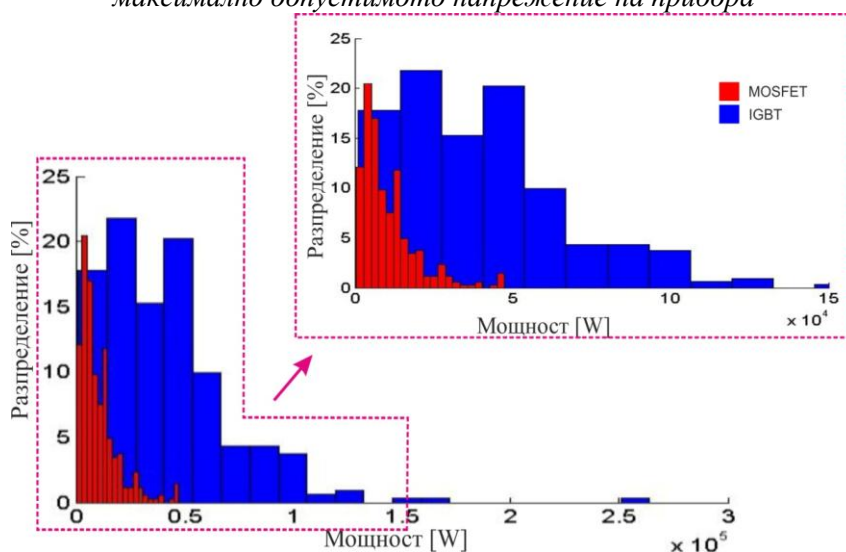
$$P_{maxIGBT} = V_{CEmax} \cdot I_C \quad (2)$$

Направени са изследвания и сравнения, отчитащи максимално напрежение (фиг. 1) и максималната комутирана мощност (фиг. 2) на представителната извадка от двата вида ключове. От сравнението е видно, че IGBT са разпределени изцяло в диапазона 600V и 1200V, докато MOSFET преобладават в диапазона 600V, като съществуват и прибори със междинни стойности заключени в диапазона 600V и 1200V.

По-малките обратни максимални напрежения на MOSFET обуславят и съответно по-малки максимални комутирани мощности за този тип прибор спрямо тези на IGBT (фигура 2).



Фиг.1 Процентно разпределение на изследваното множество IGBT и MOSFET за 2013 спрямо максимално допустимото напрежение на прибора



Фиг.2 Процентно разпределение на изследваното множество IGBT и MOSFET за 2013 спрямо максималната комутирана мощност

АНАЛИЗ НА ЕФЕКТИВНОСТТА НА ПРИБОРИТЕ

Изборът на подходящ прибор далеч не се ограничава само до правилния подбор и съвместимост със желаните работни напрежения и токове. От изключителна важност са енергийните загубите в електронните ключове. Тези загуби в процеса на работа определят ефективността на прибора, както и к.п.д на съответните електронни преобразуватели. Загубите могат да бъдат разделени на загуби от проводимост и загуби от комутация. В общият случай за IGBT тези загуби са изразени съответно със зависимости (3) и (5), а за MOSFET със (4) и (6) - тяхната сума е дадена в (7) и (8):

$$P_{condIGBT} = V_{CE(on)} \cdot I_c \quad (3)$$

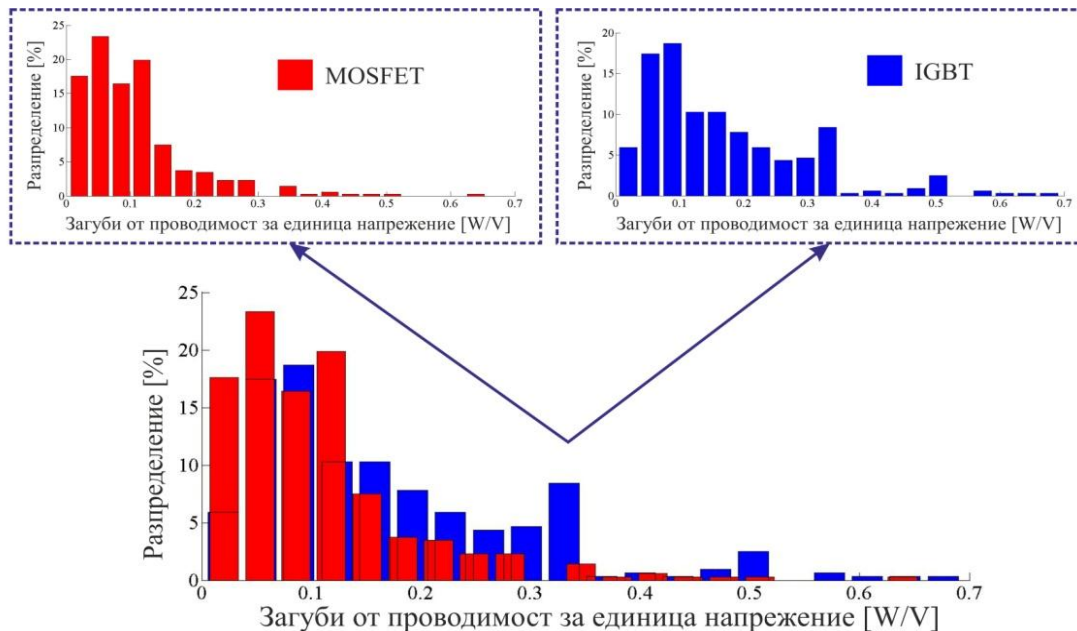
$$P_{condMOSFET} = R_{DS(on)} \cdot I_D^2 \quad (4)$$

$$P_{swIGBT} = E_{Total} \cdot f \quad (5)$$

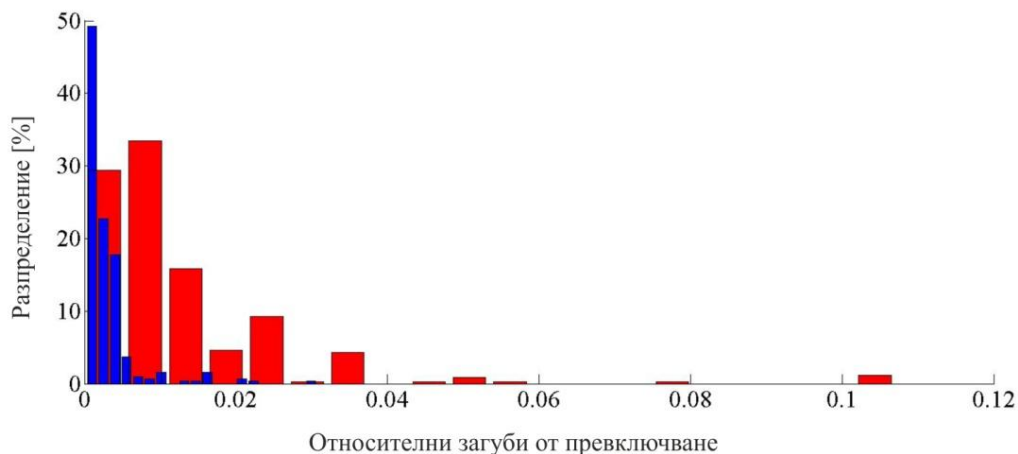
$$P_{swMOSFET} = (t_{on} + t_{off}) \cdot I_D \cdot V_{DS} + V_{DS} \cdot (Q_{rr} + t_{rr} \cdot I_D) \cdot f \quad (6)$$

$$P_{totalIGBT} = P_{condIGBT} + P_{swIGBT} \quad (7)$$

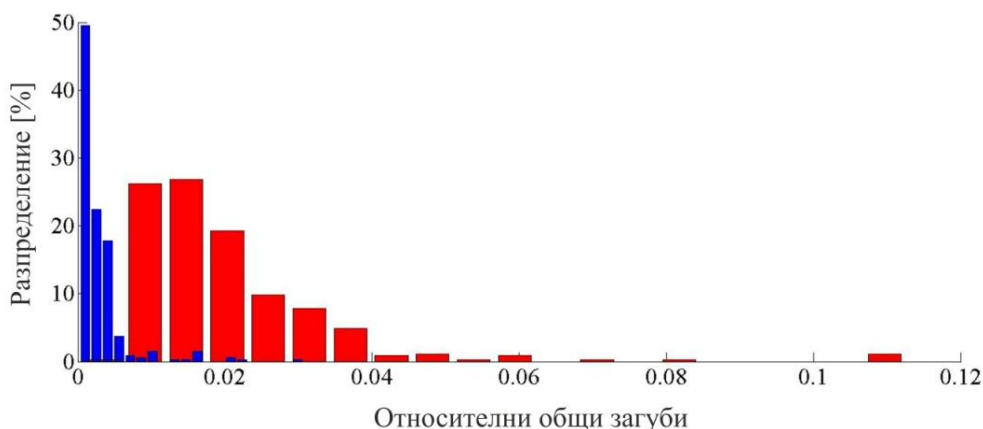
$$P_{totalMOSFET} = P_{condMOSFET} + P_{swMOSFET} \quad (8)$$



Фиг.3 Процентно разпределение на изследваното множество IGBT и MOSFET спрямо загубите от проводимост за единица максимално напрежение



Фиг.4 Процентно разпределение на изследваното множество IGBT и MOSFET спрямо комутационните загубите за единица напрежение



Фиг.5 Процентно разпределение на изследваното множество IGBT и MOSFET спрямо общите загубите за единица напрежение

Изхождайки от тези зависимости са построени съответно графиките на фигури 3, 4 и 5.

- Фигура 3 - представя сравнение на загубите от проводимост в изследваното множество IGBT и MOSFET ключове, използвайки данните актуални към 2013 година. Този тип загуби са в зависимост от максимално напрежение на транзисторите и разпределението е направено спрямо него. Вижда се, че MOSFET се характеризират с по-малки загуби от проводимост спрямо IGBT.

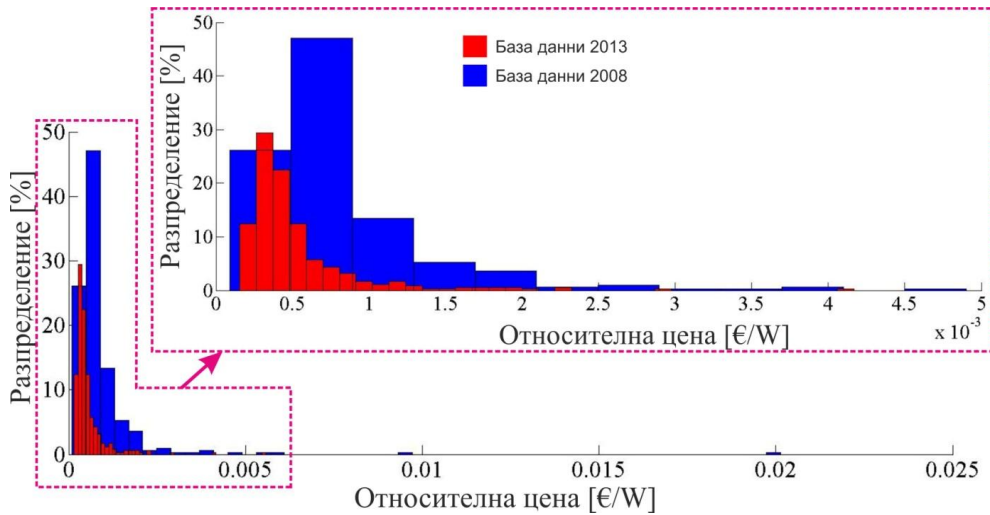
- Фигура 4 - представя относителните комутационни загуби (от превключване) за IGBT и MOSFET в изследваното множество, използвайки данните актуални към 2013 година. За да бъде адекватно сравнението, загубите от комутация на приборите са приравнени към максималната им комутирани мощност. Трябва да се отбележи, че представянето и изчисляването на този вид загуби е сравнително общо - като могат да се получат значителни разлики при изчисляване за конкретен случай, според вида на използваната информация от производителя. В случая с IGBT това е използвана общата енергия на превключване, отчетена за определено напрежение и ток, а за MOSFET времената за превключване при максимално напрежение и ток. Приемайки така направените уточнения, от фигурата е видно, че загубите от превключване за множеството IGBT са по-малки от тези за MOSFET. Това се дължи основно на по-лошите параметри на паразитните анти-паралелни диоди на MOSFET спрямо интегрираните такива на IGBT.

- Фигура 5 - представя сравнение на сумарните загуби на IGBT и MOSFET в изследваното множество, използвайки данните актуални към 2013 година. За да бъде адекватно сравнението общите загуби на приборите са приравнени към максималната им комутирани мощност. При това сравнение се отчитат по-големите загуби на MOSFET и отново може да бъде отбелязано по-доброто представяне на IGBT.

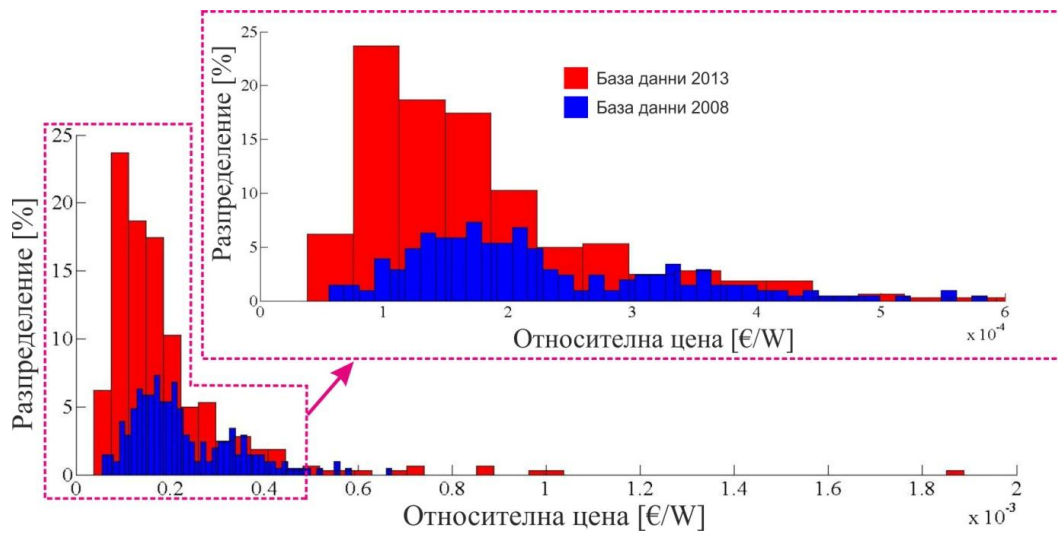
АНАЛИЗ НА ИКОНОМИЧЕСКИТЕ ПОКАЗАТЕЛИ

Този анализ разглежда икономическите показатели на изследваните електронни прибори. Разглежда се и се сравнява разпределението на цената при една и съща максимална комутирани мощност на ключовете. Анализът включва сравнение между цените на ключовете за изследвания период – фиг.6 и фиг.7 и сравнение между IGBT и MOSFET за данните актуални към момента на съставяне на публикацията – фиг.8.

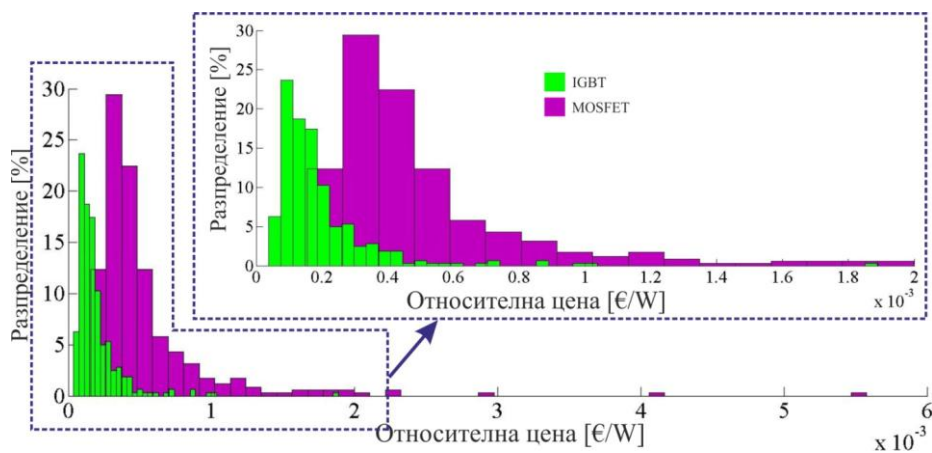
От направения анализ може да бъде проследен спада в цената на електронните ключове - както за MOSFET така и за IGBT - отнасяйки се към изследвания период 2008 ÷ 2013 година (фиг.6 и фиг.7). В допълнение за актуалната към 2013 година база данни може да бъде отчетено, че за едни и същи максимални комутирани мощности IGBT се характеризират с по-ниска цена спрямо MOSFET – фиг. 8.



Фиг.6 Процентно разпределение на изследваното множество MOSFET за 2008 и 2013 спрямо относителната цена в евро за един ват комутирана мощност



Фиг.7. Процентно разпределение на изследваното множество IGBT за 2008 и 2013 спрямо относителната цена в евро за един ват комутирана мощност



Фиг.8 Процентно разпределение на изследваното множество IGBT и MOSFET за 2013 спрямо относителната цена в евро за един ват комутирана мощност

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведеното е статистическо сравнение, обхващащо 306 MOSFET и 205 IGBT прибора актуални към 2008 година и 355 MOSFET и 332 IGBT прибора актуални към 2013 година. За изследвания напреженов диапазон 600V÷1200V, където IGBT и MOSFET могат да бъдат директно сравнявани, са изведени следните заключения:

- В изследваното множество ключове съществуват повече на брой прибори от вида IGBT, което обуславя по-голямо разнообразие, свързано съответно с по-малки загуби и по-ниска цена спрямо конкурентните MOSFET;
- Общите загуби от превключване на IGBT са чувствително по-малки от тези за MOSFET. Това се дължи основно на по-лошите параметри на паразитните анти-паралелни диоди на MOSFET спрямо интегрираните такива на IGBT;
- MOSFET ключовете поради ниското им изходно съпротивление се характеризират със сравнително по-малки загуби от проводимост спрямо IGBT.
- При сравнение на общите загуби на приборите, приравнени към максималната им комутирана мощност, IGBT са със значително по-добри показатели;
- При едни и същи максимални комутирани мощности IGBT се характеризират с по-ниска цена спрямо MOSFET;
- Сравнението на развитието на приборите за изследвания 5-годишен период показва общо намаляване на цената на приборите, по което може да се съди за тяхното активно технологично развитие и използване.

Авторът предоставя съставената база данни за над 1200 прибора за свободно ползване на <http://www.tu-varna.bg/tu-varnaetm/images/Research/Valchev/transistor%20data.rar>.

References

- [1] Lee, F.C., The state-of-the-art power electronics technologies and future trends, Power Engineering Society Summer Meeting, 2000. IEEE
- [2] Tan, P., Performance analysis of MOS-controlled bipolar power devices, Power Electronics and Drive Systems, 1995., Proceedings of 1995 International Conference on
- [3] Hefner, A., Jr. , Automated parameter extraction software for advanced IGBT modeling, Computers in Power Electronics, 2000. COMPEL 2000. The 7th Workshop on
- [4] Dubhashi, A. A comparison of IGBTs and power MOSFETs for variable frequency motor drives, Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1989. APEC' 89. Conference Proceedings 1989., Fourth Annual IEEE
- [5] Jang, S.-R. , Ryoo, H.-J. , Goussev, G. , Rim, G.H. , Comparative study of MOSFET and IGBT for high repetitive pulsed power modulators, IEEE Transactions on Plasma Science, Volume 40, Issue 10 PART 1, 2012, Article number 6155610, Pages 2561-2568