

**СЪВРЕМЕНО РАЗВИТИЕ НА GAN ТРАНЗИСТОРИТЕ
И ТЯХНОТО ПРИЛОЖЕНИЕ****Петко Маринов, Доброслав Данков***Катедра Електроника, Факултет по Електротехника и Електроника
Технически университет - Габрово***THE RECENT EVOLUTION OF GAN TRANSISTORS
AND THEIR APPLICATIONS****Petko Marinov, Dobroslav Dankov***Department of Electronics, Faculty of Electrical Engineering and Electronics
Technical University of Gabrovo***Abstract**

This paper focuses on recent advances in gallium nitride (GaN) transistors and their impact on improving energy efficiency in various applications. GaN technology has significantly improved the performance and reliability of electronic devices. In this paper, we review the major manufacturers, specifications, body options, and widespread applications of GaN transistors.

We also discuss a simulation study involving an induction hob in which the original IGBT transistors were replaced with GaN transistors, highlighting the potential benefits of GaN technology in practical scenarios.

In conclusion, this paper highlights the current use of GaN transistors and their role in the development of energy efficient technologies as demonstrated in the induction hob simulation. These developments highlight the significant contribution of GaN transistors in modern electronics.

Keywords: Power electronics transistors; GaN; Evolution; Reliability.

ВЪВЕДЕНИЕ

Внедряването на широкозонните полупроводникови материали в областта на силовата електроника е наложително в съвременните условия, с оглед повишаване на енергийната ефективност на устройствата и модулите, както и редуциране на глобалното потребление на електроенергия. Транзисторите на базата на галиев нитрид (GaN) се отличават с изключителни характеристики, което ги прави предпочитани за разнообразие от приложения в силовата електроника. Тяхната широка пропускателна способност позволява бързо зареждане на гейта, работа при високи работни честоти и компактни размери в сравнение с тради-

ционните силициеви транзистори. В момента галиевият нитрид (GaN) е вероятно най-предизвикателната технология в областта на силовата електроника, която позволява разработването на атрактивни устройства с повишена плътност на мощността, намалено съпротивление и много висока честота на превключване.

Поради високата скорост на превключване GaN силовите електронни устройства изискват внимателно проектиране на разположението на силовия контур в преобразователните приложения. Също е нужен и подходящ корпус, който да намалява паразитните индуктивности и да се разсява топлината, дължаща се на високата енергийна плътност на уст-

ройството. Чиповете с намален размер в сравнение със силициевите устройства позволяват по-висока честота на превключване (до десетки MHz) и намаляване на обема на преобразувателите на мощност. Това улеснява интеграцията на преобразуватели и интегрираните модулни, моторни задвижвания, и осигурява по-ефективни решения за силовата електроника. Технологичният напредък на GaN устройствата въздейства особено върху области като нисковолтово хранване, телекомуникации, сървъри и безжично зареждане.

Целта на настоящата публикация е да се предостави детайлен преглед на съвременното развитие на транзисторите на базата на галиев нитрид (GaN) и тяхното приложение в областта на силовата електроника. Изследването се фокусира върху индукционен котлон, първоначално оборудван с IGBT транзистори, като последващо се извършва подмяна с GaN транзистори за сравнителен анализ на двете технологии.

КЛАСИФИКАЦИЯ НА GAN ТРАНЗИСТОРИТЕ

А. Основни параметри:

Основен параметър на широкозонните полупроводникови транзистори на базата на GaN е широчината на забранената зона:

Таблица 1. Преглед на широчината на забранената зона на различни видове полупроводници. [1]

Материал:	Химичен символ	Забранена зона (eV)
Германий	Ge	0,7
Силиций	Si	1,1
Галиев Арсен	GaAs	1,4
Силициев Карбид	SiC	3,3
Галиев Нитрид	GaN	3,4
Галиев Оксид	GaO	4,8
Диамант	C	5,5

Както може да се види на таблица 1, GaN (Галиевият нитрид) е с забранена зона от 3,4 eV. В резултат на това устройствата на GaN трябва да имат по-

нисък ток на утечка и да предоставят възможност за работа при по-високи температури. Други ключови аспекти са високото критично електрическо поле и максимално пробивно напрежение на материала, което прави GaN обещаващ полупроводник за устройства с високо напрежение. В частност, възможността да се постигне целево пробивно напрежение (VB) с по-тънки дрейфови слоеве води до значително намаляване на специфичното съпротивление при включване (Ron) в сравнение с устройствата на Si. По този начин могат да бъдат произведени по-компактни устройства, минимизиращи както статичните, така и динамичните загуби. Накрая, очаква се устройствата на GaN да имат възможност за превключване при висока честота, поради високата наситена електронна скорост на материала. [2].

Ползите от използването на широкозонните полупроводникови транзистори включват:

- 90% от загубите на енергия, които се получават по време на преобразуването на енергия се елиминират.
- По-високи честоти на превключване в сравнение с устройствата на базата на Si до 10 пъти.
- По-висока максимална работна температура в сравнение с устройствата на базата на Si.
- Системи с по-ниско общо потребление на енергия.

- Пробивно напрежение:

GaN транзисторите имат висока напрежение на пробив, което им позволява да работят при високи напрежения без срыв.

- Скорост на превключване: GaN транзисторите са бързи и могат да превключват бързо, което ги прави подходящи за приложения с високи честоти.

- Ефективност:

Те имат висока ефективност при конвертиране на електрическа мощност, което може да намали загубите при преобразуването на енергия.

- Температурен диапазон:

GaN транзисторите могат да работят при по-широк температурен диапазон в сравнение с някои други транзистори.

- Работен ток и напрежение:

Тези параметри зависят от конкретния модел и производител на GaN транзисторите и могат да варират значително.[1]

Б. Класификация на GaN транзисторите по параметри:

Таблица 2, представя различни серии GaN транзистори от разнообразни производители, като подчертава ключовите параметри като честотен обхват, напрежение, съпротивление в проводимо състояние $R_{DS(on)}$, максимално напрежение дрейн-сорс $V_{DS} [Max]$ и максимален дрейнов ток $ID [Max]$. Характеристиките показват широка гама от потенциални приложения, от радиочестотни комуникации до захранвания и усилватели.

Таблица 2. Класификация на GaN транзистори по серии и параметри.

Производител	Серия	Честотен обхват	Напрежение (От-до)	Структура	$R_{DS(on)}$	$V_{DS} [Max]$	$ID [Max]$
Cree/Wolfspeed	CGH	DC - 18 GHz	28V-600V	HEMT	20mΩ	650V	30A
Qorvo	QPD	DC - 12 GHz	~50V	HEMT	15mΩ	50V	40A
EPC	EPC20xx	DC - 6 GHz	100V, 200V, 650V	HEMT	25mΩ	600V	50A
GaN Systems	GS-xxx	DC - 6 GHz	100V-650V	HEMT	10mΩ	650V	60A
Texas Instruments	LMG	DC - 5 GHz	30V-600V	HEMT	30mΩ	600V	25A
NXP	MWR	DC - 8 GHz	~50V	HEMT	12mΩ	55V	35A
ON Semiconductor	NTP8G	DC - 5 GHz	100V-650V	HEMT	22mΩ	650V	40A
Analog Devices	ADxxxx	DC - 6 GHz	Разнообразни	HEMT	18mΩ	60V	45A
Panasonic	PGA26E	DC - 5 GHz	30V-600V	HEMT	28mΩ	580V	38A
Infineon	CoolGaN	DC - 6 GHz	100V-650V	HEMT	20mΩ	600V	45A
MACOM	MAGE	DC - 40 GHz	50V	HEMT	10mΩ	50V	20A
STMicroelectronics	STGaN	DC - 6 GHz	100V-650V	HEMT	25mΩ	600V	50A
Fujitsu	FLC	DC - 14 GHz	28V-50V	HEMT	15mΩ	50V	40A
Toshiba	TPH	DC - 6 GHz	100V-650V	HEMT	30mΩ	650V	55A
Navitas Semiconductor	NVS	DC - 6 GHz	100V-650V	HEMT	10mΩ	600V	60A
Osram Opto Semiconductors	GaN	DC - 5 GHz	Low	HEMT	N/A	Low	N/A
Nexperia	GaNxxx	DC - 6 GHz	30 V - 650 V	HEMT	25 mΩ	650V	30 A
Rohm	GaNxxxR	DC - 5 GHz	50 V - 600 V	HEMT	20 mΩ	600V	35 A

Таблица 3, представя различните корпуси на GaN транзистори, предоставени от различни производители. Видове корпуси, които се използват от тези производители, са TO-220, TO-247, TO-263, QFN и SOT-23. Някои производители, като GaN Systems и Rohm, предлагат повече от един тип корпус за своите продукти. Основно се фокусира върху максималната разсейвана мощност (PD_{max}) в зависимост от корпуса на компонента. Тя дава информация за максималната мощност, която може да се разсее без да се превиши допустимата граница за температура на компонента. Тази характеристика е критична за проектирането на електронни устройства, тъй като позволява на инженерите да изберат най-подходящия компонент в зависимост от термалните изисквания на приложението. Изборът на правилния компонент може да бъде решаващ за ефективността, дълготрайността и надеждността на цялата система.

Таблица 3. Класификация на GaN транзистори по корпуси

Производител	Корпус	Разсейвана мощност/ PD_{max}
Cree/Wolfspeed	TO-247	125W
Qorvo	QFN	60W
EPC	QFN	50W
GaN Systems	QFN/PQFN	70W
Texas Instruments	TO-247	60W
NXP	TO-263	85W
ON Semiconductor	TO-220	55W
Analog Devices	SOT-23	30W
Panasonic	QFN	65W
Infineon	TO-220	120W
MACOM	TO-247	95W
STMicroelectronics	TO-263	80W
Fujitsu	TO-220	78W
Toshiba	SOT-23	75W
Navitas Semiconductor	QFN	70W
Osram Opto Semiconductors	DFN	50W
Nexperia	TO-220	96W
Rohm	TO-220/TO-263	115W

Таблица 4. Класификация на GaN транзистори по серии и приложение

Производител	Приложение
Cree/Wolfspeed	RF приложения, Базови станции, Превключващи захранвания
Qorvo	RF усилватели, Мрежови усилватели
EPC	Превключващи захранвания, Безжични зарядни устройства
GaN Systems	Захранване на автомобили, Устройства за електрическо захранване
Texas Instruments	Моторни контролери, RF приложения
NXP	Базови станции, RF усилватели
ON Semiconductor	Превключващи захранвания, Мрежови усилватели
Analog Devices	Безжични данни, WiFi усилватели
Panasonic	Усилватели за висока честота, RF приложения
Infineon	Захранване на автомобили, Превключващи захранвания
MACOM	Радио и телевизионни предаватели, Радиолокационни системи
STMicroelectronics	Моторни контролери, Превключващи захранвания
Fujitsu	Базови станции, RF усилватели
Toshiba	Превключващи захранвания, Безжични зарядни устройства
Navitas Semiconductor	Захранване на автомобили, Устройства за електрическо захранване
Osram Opto Semiconductors	LED осветление, UV осветление
Nexperia	Моторни контролери, Превключващи захранвания
Rohm	Безжични данни, WiFi усилватели

Таблица 4, представя приложенията на GaN транзистори, предоставени от различни производители. Често срещаните приложения сред производителите включват радиочестотни усилватели, базови станции, превключващи захранвания и моторни контролери. Някои компании, като Osram Opto Semiconductors, имат уникални приложения като LED и UV осветление, а други се фокусират върху специфични сектори като автомобилната индустрия или безжичните зарядни устройства.

В. Класификация на GAN транзисторите по приложения:

- **Захранващи системи:** GaN транзисторите позволяват разработката на компактни и ефективни преобразуватели за захранване. Те позволяват на устройствата да работят при високи напрежения и честоти с по-малко загуби в сравнение със силициевите транзистори.

- **Безжично зареждане:** GaN технологията улеснява разработката на бързи и ефективни решения за безжично зареждане.

- **RF (радиочестотни) приложения:** GaN транзисторите се използват широко в радиочестотните усилватели поради високата им ефективност, мощност и термична стабилност. Това ги прави предпочитан избор за радарни системи, спътникови комуникации и мобилни базови станции.

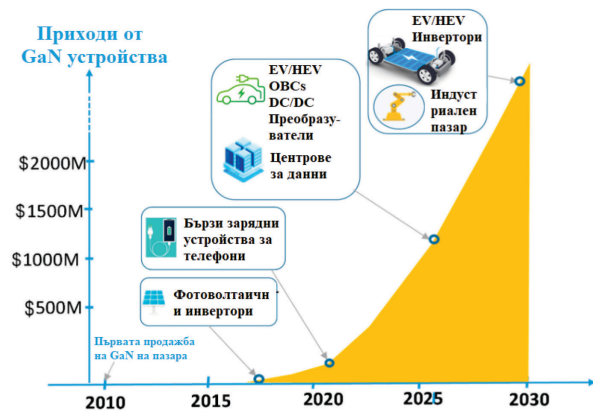
- **Автомобилни приложения:** С развитието на електромобилите и усиляването на нуждата от високоефективни и компактни преобразуватели, GaN транзисторите намират приложение и в автомобилната индустрия.

- **Осветление:** GaN основните LED диоди са в основата на съвременното LED осветление, което предлага висока ефективност и продължителен живот.

- **Иновации в производството:** През последните години наблюдаваме продължителни усилия за оптимизация на процесите на производство на GaN транзистори, което води до намаляване на

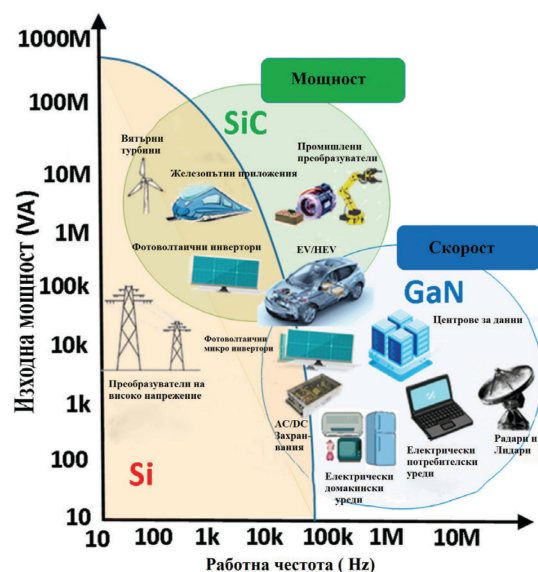
цените и по-широко приложение в различни области.

GaN захранващи устройства: Развитие в дългосрочен план



Фиг. 1. Дългосрочна еволюция на GaN устройствата за силова електроника на китайския пазар (Доклад за GaN устройствата за силова електроника, Yole intelligence 2023)

Фиг. 1 описва развитието на навлизането на GaN устройствата на пазара на силова електроника, като подчертава тяхните приложения. Понастоящем цената е едно от съществените ограничения, докато надеждността и устойчивостта постепенно се подобряват с появата на нови поколения устройства на пазара. [3]



Фиг. 2. Области на приложение на SiC и GaN транзистори за силова електроника. [3]

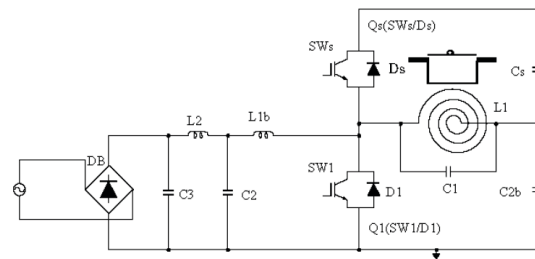
ПРИЛОЖЕНИЕ НА GAN ТРАНЗИСТОРИТЕ В СИЛОВАТА ЕЛЕКТРОНИКА

Като пример за приложение на GaN транзисторите се разглежда примера със приложението им в сферата на индукционното нагряване и в частност на индукционните котлони. Един от проблемите в тази сфера е невъзможността за загряване на домакински съдове от цветни метали или от неферромагнитни метали, тъй като съществуващите схемни решения са ориентирани към използване на IGBT Si транзистори, работещи в честотния диапазон 20-50 kHz.

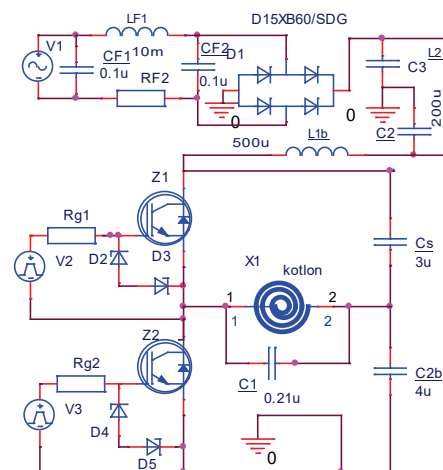
Използват се различни варианти на квази-резонансни „меко“ превключващи еднотактни инверторни схеми с мощност до 2 kW за битово приложение и полумостови резонансни инверторни схеми в диапазона от 2 до 3,5 kW при професионалните решения. Докато еднотактните схеми са добре изучени и анализирани от авторите [6,7], то анализа и приложението на полумостовите схеми за индукционни котлони представлява интересна задача.

На фиг. 3 е дадено най-разпространеното схемно решение на професионален индукционен котлон на базата на полумостов резонансен инвертор с IGBT Si транзистори [8]. Приложението на GaN за замяна на IGBT Si транзисторите е свързано с ниското им съпротивление в проводимо състояние и по - голямата скорост на превключване при съпоставими параметри по отношение на максимално допустимите им напрежение и ток. За проверка на тази хипотеза е направена компютърна симулация на схемата от фиг.4 чрез P-Spice v2022, като резултатите са сравнени с експерименталните данни от работата на схемата, представени на фиг.5. Графичното съвпадение на представените токове и напрежения показват достоверността на симулационните изследвания, при използването на точен модел на IGBT GT60M322 транзистора. На тази база могат да се направят някои изследвания, които чис-

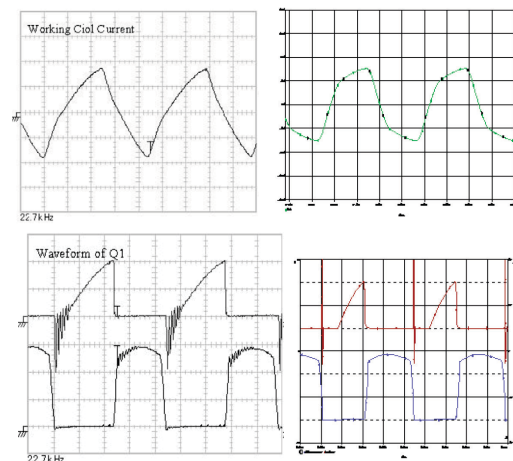
то експериментално са трудно постижими – например установяване на загубите в отделните елементи на схемата, което е важно за оценка на ефективността и евентуално за изчисления по надеждност по нататък. При симулационното изследване липсват характерните осцилации при превключване причинени от паразитния капацитет на сондата на осцилоскопа.

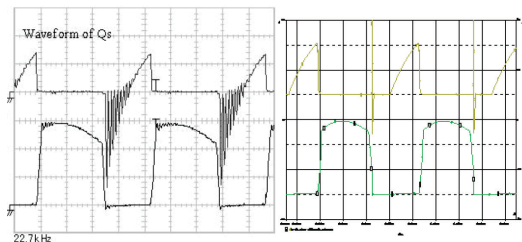


Фиг. 3. Схемно решение на професионален индукционен котлон с IGBT GT60M322.



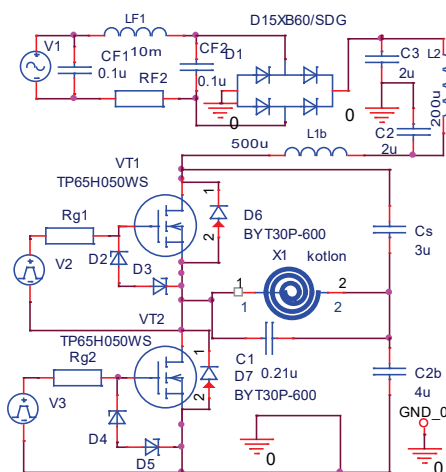
Фиг. 4. Схема за P-Spice симулация на професионален индукционен котлон с IGBT GT60M322.





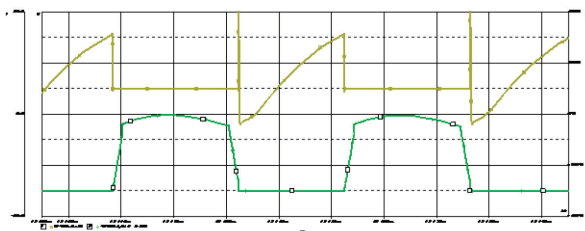
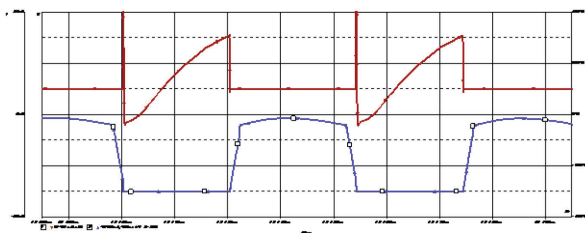
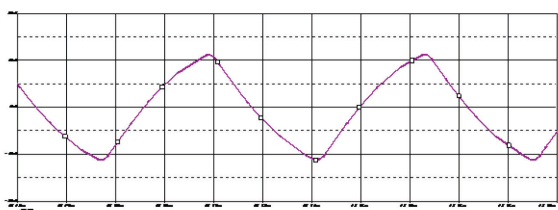
Фиг. 5. Времедиаграми на напрежението и тока за Q1, Qs и LI от експеримент и от симулация. Ос на тока: 40 A/div, ос на напрежението: 200 V/div, ос на времето: 10 us/div.

На базата на доброто съвпадение на опитните и симулационните резултати при работата на индукционния котлон с Si IGBT GT60M322, транзисторите се заменят с GaN MOSFET тип TP65H050WS на фирмата Transphorm Inc., с приблизително същите ток и напрежение като IGBT.



Фиг. 6. Схема за P-Spice симулация на професионален индукционен котлон с GaN MOSFET тип TP65H050WS.

Резултатите от работата на индукционния котлон с GaN MOSFET са показани по-долу. Тук главното преимущество на GaN е ниското съпротивление в проводимо състояние, което повлиява върху малките загуби от проводимост.



Фиг. 7. Времедиаграми на напрежението и тока за Q1, Qs и LI от експеримент и от симулация.

Таблица 5. Сравнение на използването на различните типове транзистори по отношение на ефективността.

Si IGBT

Вх. мощност	520	900	1400	2050	2500	3000	3500
Изх. мощност	450	800	1200	1800	2200	2640	3090
К.п.д., %	87	89	86	88	88	88	88

GaN MOSFET

Вх. мощност	485	850	1320	1890	2400	2850	3350
Изх. мощност	450	800	1250	1800	2200	2650	3100
К.п.д., %	92,8	94,1	94,7	95,2	91,7	93	93

Таблица 6. Разсейвана мощност в инвертори с Si IGBT и GaN MOSFET за инд.котлон.

Компоненти	Разсейвана мощност	
	Инвертор с Si IGBT	Инвертор с GaN MOSFET
Q1(SW1/D1)	45	12
Qs(SWs/Ds)	40	11
L1	25	50
L1b	1	0,2
L2	1	0,2
DB	6	5
C1	13	1,4
Общо	131	79,80

Тъй като използваната полумостова схема на индукционния котлон е с „мек“ превключване при нулево напрежение – т.нар. ZVS комутация, тук предимството от голямото бързодействие при превключване на GaN не може непосредствено да се наблюдава. Независимо от това ефективността значително се подо-

брява, както се вижда от направените изследвания по отношение на входна и изходна мощност при двата вида транзистори представени в табл. 5.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Направен е преглед на съвременното развитие на GaN транзистори и тяхното приложение. Представени са симулационни резултати на работата на индукционен котлон с IGBT транзистори, последствие заменени с транзистори на базата на GaN. Наблюдава се, че при използването на GaN транзисторите, загубите на мощност се намаляват с близо 50 W или около 40 %.

ACKNOWLEDGMENT

Авторите биха искали да благодарят на всички рецензенти за техните съвети и предложения за подобряване на този доклад. Настоящият доклад е изготвен във връзка с изпълнението на договор №2303У/16.03.2023 г., към УЦНИТ на Технически университет – Габрово.

REFERENCES

[1] “The great semi debate: SiC or GaN”, available at

- <https://www.electronicdesign.com/power-management>, accepted: 18.07.2023.
- [2] Roccaforte F., G. Greco, P. Fiorenza, F. Iucolano. An Overview of Normally-Off GaN-Based High Electron Mobility Transistors, *Materials*, 2019; 12(10), <https://doi.org/10.3390/ma12101599>.
- [3] Musumeci, S.; Barba, V. Gallium Nitride Power Devices in Power Electronics Applications: State of Art and Perspectives. *Energies* 2023, 16, 3894. <https://doi.org/10.3390/en16093894>
- [4] GaN & SiC Technologies for Power Electronics, Richardson RFPD, June 2021.
- [5] “What is Gallium Nitride (GaN), available at epc-co.com accepted: 18.07.2023.
- [6] D. Dankov, „Modeling and research of induction cooktop“, *Izvestiya TU - Gabrovo*, vol. 42, pp. 93-98, 2011, ISSN 1310-6686 (in Bulgarian).
- [7] Dankov D., „Investigation of inverter circuits for induction cooktops“, *Unitech'11 - proceedings*, 18 - 19 November, 2011, Gabrovo, pp.I-241 - pp.I-246, ISSN 1313-230X. (in Bulgarian).
- [8] Yasui K., M. Mihara, H. Omori and M. Nakaoka, "Latest Developments of Soft-Switching Pulse Modulated High Frequency Conversion Systems for Consumer Induction Heating Power Appliances," 2007 Power Conversion Conference - Nagoya, Nagoya, Japan, 2007, pp. 1139-1146.