

НОВИ ТЕХНОЛОГИИ НА СИЛОВАТА ЕЛЕКТРОНИКА С АЕРОКОСМИЧЕСКО ПРИЛОЖЕНИЕ

Павлин Граматиков

*Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките
e-mail: pgramatikov@space.bas.bg*

Ключови думи: *Първични и вторични източници за захранване, проектиране на ключови източници за захранване, ефективност на електрозахранващите източници, електрозахранващи системи.*

Резюме: *Представени са нови компоненти на силовата електроника, перспективни схемни и структурни решения на захранващи системи. Описано е приложението на съвременни високопроизводителни транзистори и чипове за силова електроника. Обсъждат се електрически батерии, инструменти и методи за намаляване на теглото и подобряване на ефективността на енергийните системи с аерокосмически приложения.*

NEW POWER ELECTRONICS TECHNOLOGIES WITH AEROSPACE APPLICATION

Pavlin Gramatikov

*Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences
e-mail: pgramatikov@space.bas.bg*

Keywords: *Primary and secondary power supplies, switching power supply design, power supplies efficiency, power systems.*

Abstract: *New components of the power electronics, perspective schematic and structural solutions of power supply systems are presented. The application of modern high-performance transistors and chips for power electronics is described. Electric batteries, tools and methods for reducing weight and improving the efficiency of power systems with aerospace applications are discussed.*

Въведение

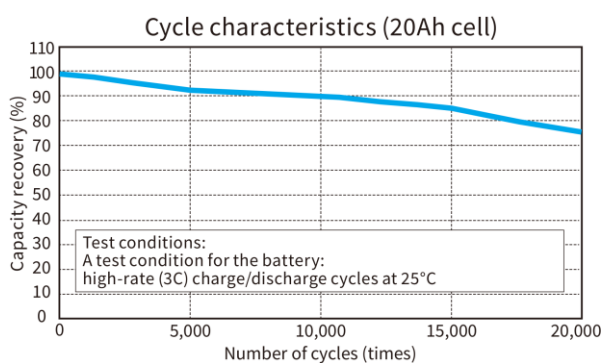
Силовата електроника се използва за промяна на параметрите на напрежението и тока на електричеството. Тя все по-масово се прилага в: контролерите на електрическите двигатели, инверторите на електрическите автомобили; климатични системи; сървърите за интернет и други. Толкова масово е приложение на силовата електроника, че подобряването на нейната ефективност може да спести 900 милиарда долара през 2025 г. [1].

Затова все по-актуално става разработването и приложението на нови високоефективни електронни транзистори и чипове за силовата електроника. Перспективни в това направление са GaN продуктите. Модерните GaN транзистори и схеми вече се произвеждат в добре познатите линии за силициевы прибори. Цената е същата, но параметрите на GaN устройствата е с порядък по-добра. С тяхното приложение: намалява обема на енергийните електронни системи до 10 пъти; спадат топлинните загуби до 50 % и се изгражда ново поколение на силови електронни системи с голяма икономия на енергията. В повечето системи транзисторите като физика трябва да бъдат по подразбиране „изключени“ за да се избегне късо съединение. Но GaN транзисторите обикновено са „нормално включени“ - винаги позволяват протичането на ток [1].

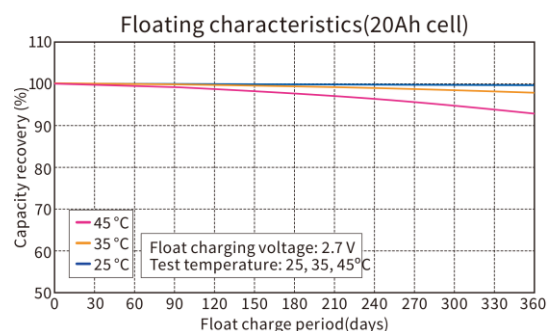
Перспективен за приложение в космически условия е литий-титанатния акумулатор (LTO) с анод, произведен от литиев титанат ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$), с увеличена площ до $100 \text{ m}^2/\text{g}$, а досегашните

анооди от въглерод имат само 3 m²/g. Този анод гарантира висока плътност на тока при заряд и разряд, а времето на заряд значително се съкращава. През 2017 година LTO акумулаторите имат плътност на енергията до 177 Wh/l и без загуби на качествата работят при ниска температура до -30 °C, а класическите литий-йонни батерии (LIB) още при -5 °C снижават своите показатели на 20 %. Недостатък на Li₄Ti₅O₁₂-акумулаторите е ниското напрежение – 2,4 V (LIB имат работно напрежение 3,7 V). Съответно праговете на заряд и разряд са 2,8–1,8 V и специфична енергия на LTO е 30–110 Wh/kg, по-ниска от тази на LIB [3].

Например „Toshiba“ произвежда LTO акумулатори с името „Super Charge Ion Battery“ (SCiB) със следните параметри: бърз заряд до 90 % от капацитета за 6 min; срок на работа до 25 години; брой на циклите заряд/разряд ≥ 25 000; специфична енергия 60–100 Wh/kg. Предимствата на SCiB са следните: нисък риск от експлозия; дълъг живот; бързо зареждане; висока входна и изходна мощност; голям капацитет [2]. Например акумулаторът „SCiB-20 Ah“ има следните параметри: номинално напрежение 2,4 V; време на заряд 0–80 % за 6 min; маса 515 g и размери W116 × D22 × H106 mm [2]. Приложенията на SCiB са: производство на енергия от фотоволтаици; дронове; електроавтомобили; роботи; непрекъсваеми електрозахранвания; електрически велосипеди и др. От Фиг. 1 се отчита, че след 20 000 цикъла на заряд и разряд с 3C при 25 °C капацитетът на акумулатора „SCiB-20 Ah“ се запазва на 75 %, а на Фиг. 2 се вижда негово намаляване със 7 % при неправилно съхранение при 45 °C за 360 дни.



Фиг. 1. Спадане на капацитета на „SCiB-20 Ah“ според броя на циклите с ток на заряд и разряд 3C [2]



Фиг. 2. Спадане на капацитета на „SCiB-20 Ah“ според температурата и дни на съхранение [2]

Табл. 1. Параметри на литиево-йонни акумулатори с космическо приложение на фирма „Saft“ [6]

	ЕНЕРГИЯ				УСЛОВИЯ ЕКСТРЕМАЛЬНОГО ХОЛОДА	С УВЕЛИЧЕННЫМ СРОКОМ СЛУЖБЫ И РАСШИРЕННЫМ ДИАПАЗОНОМ ТЕМПЕРАТУР	HIGH TEMPERATURE	
	VL 34570 xlr	MP 144350 xlr	MP 174865 xlr	MP 176065 xlr	MP 176065 xc	MP 174565 xtd	MP 176065 xtd	VL 32600-125
Форм-фактор	Цилиндрический D	Призма	Призма	Призма	Призма	Призма	Призма	Цилиндрический D
Номинальное напряжение	3,65 В	3,65 В	3,65 В	3,65 В	3,65 В	3,65 В	3,65 В	3,6 В
Номинальная производительность	5,4 А·ч	2,6 А·ч	5,3 А·ч	6,8 А·ч	6,4 А·ч	4,0 А·ч	5,6 А·ч	4,5 А·ч
Макс. ток непрерывного разряда	11,0 А	5,0 А	10,0 А	14,0 А	13,0 А	8,0 А	11,0 А	2,3 А
Максимальный импульсный ток разряда	21,0 А	10,0 А	21,0 А	27,0 А	26,0 А	16,0 А	22,0 А	3,4 А
Макс. зарядный ток	5,4 А	2,6 А	5,0 А	6,8 А	6,5 А	4,0 А	5,6 А	0,9 А
Предельное количество циклов (Цикл до 70 % от исходной емкости батареи)	>600 (при глубине разряда 100 %, C/2-C/2, +20°C)	1100 (при глубине разряда 100 %, C-C/2, +20°C)	950 (при глубине разряда 100 %, C-C/2, +20°C)	1800 (при глубине разряда 100 %, C-C/2, +20°C)	800 (при глубине разряда 100 %, C-C/2, +20°C)	2700 (при глубине разряда 100 %, C-C/2, +25°C)	2700 (при глубине разряда 100 %, C-C/2, +25°C)	30 (при глубине разряда 100 %, C/5-C/5, +125°C)
Диапазон температур разряда	-35 / +60°C	-35 / +60°C	-35 / +60°C	-35 / +60°C	-50 / +60°C	-40 / +85°C	-40 / +85°C	0 / +125°C
Температурный диапазон заряда	-30 / +60°C	-30 / +60°C	-30 / +60°C	-30 / +60°C	-30 / +60°C	-30 / +85°C	-30 / +85°C	0 / +125°C

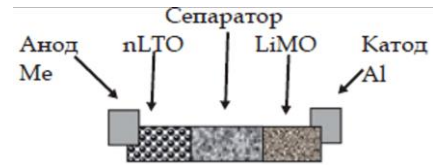
Перспективно е приложението на Li₄Ti₅O₁₂ за аноден материал на хибридни суперкондензатори [3]. При заряд в един LTO акумулатор анодът Li₄Ti₅O₁₂ приема три йона Li⁺ на една формулна единица. При фазов преход се възстановяват три атома Ti⁴⁺ от пет, което дава теоретически специфичен капацитет 175 mAh/g на LTO. На практика се достигат 175 mAh/g след 100 дълбоки разрядни цикъла [4].

Китайски производител на LTO акумулатори е „EVLITHIUM LIMITED“, предлагащ цилиндрични батерии: капацитет 30 Ah, 35 Ah, 40 Ah и 55 Ah; напрежение 2,7 V; 30 000 цикъла; бърз и стандартен заряд за 0,2 h и 0,5 h. Вътрешното съпротивление е около 1 mΩ [8].

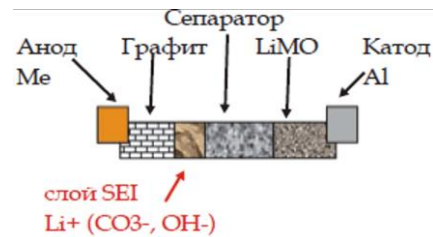
Партньор на ФКА „Роскосмос“ са два производителя на LTO и LIB с космическо приложение: руското конструкторско бюро „АКВ-Energy“ [5] и френската фирма „Saft“ [6], предлагаща призматични MP и цилиндрични VL акумулаторни литиево-йонни батерии (Табл. 1) разполагащи със следните функции за безопасност: електронна защитна верига; вграден прекъсвач при повреда на зарядното устройство; предпазен клапан и изключващ сепаратор. Версията VL има: работна температура до 100 °С; продължителен разряд с 2 С и импулсен разряд до 4 С [6]. Техническите спецификации са: номинално напрежение 3,6 V–3,75 V; енергийна плътност до 385 Wh/l и 180 Wh/kg; диапазон по мощност до 1 kW/kg [6].

Система АКБ	Свинцово-кислотные с панцирным катодом	Li-ion, традиционные Катод - LiFePO ₄ , LiMn ₂ O ₄ и др. Анод –С (углеродный анод)	n LiTiO Катод - LiFePO ₄ , LiMn ₂ O ₄ и др. Анод –наночастицы Li ₂ Ti ₅ O ₁₂
Количество циклов при разряде на 80 % (С-это емкость аккумулятора)			
Ток нагрузки 0.5 С	1000	2500	29 000
Ток нагрузки 1 С	500	1000	22 000
Ток нагрузки 2 С	100	500	16 000
Ток нагрузки 5 С	50	300	8 000
Ток нагрузки 10 С	10	0	5 000
Количество циклов при разряде на 3-4 %			
Ток нагрузки 0.5 С	30 000	200 000	10 000 000
Остаточная емкость при температуре минус 40 С° и токе нагрузки 2 С	0.5 %	0.5 %	80 %
Заряд аккумулятора при температуре	ниже -40 С° возможен	ниже -5 С° не возможен	ниже -40 С° возможен
Максимальный ток заряда	0,2 С	2 С	10 С

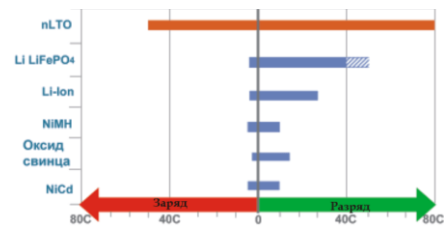
Фиг. 6. Параметри на оловни, Li-ion и „n LiTiO“ акумулатори [5]



Фиг. 3. Структура на „n LiTiO“ [5].



Фиг. 4. Структура на Li-ion [5].

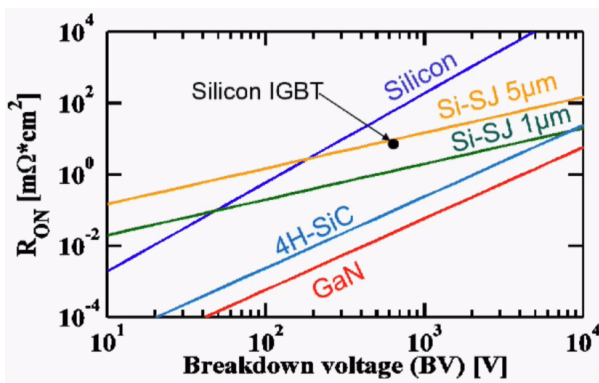


Фиг. 7. Сравнение на акумулатори [5]

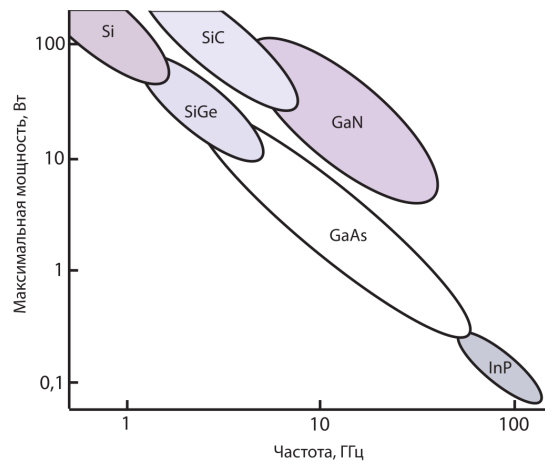
Карбон-титанатният акумулатор (СТВ) е ново поколение LTO. За анод в СТВ се използва порест въглерод с 20 пъти по-голяма площ спрямо графита. При СТВ (спрямо LTO) ресурсът е снижен – 12 000 цикъла (или 15 години), но СТВ запазва достоинства на LIB (най-висока плътност на енергията, ниско тегло и габарити) [7]. Работният диапазон на СТВ е 2,5–4,2 V, като на LIB. Пример за СТВ е „CrTi3721-3,7 V 21 Ah“ на фирма „GreenTECH“, USA. Времето за пълнен заряд е 30 min. Ето и други параметри: разряден ток 126 A; заряден ток 42 A при 0–60 °С; работни температури от –20 °С до +60 °С; вътрешно съпротивление 1–1.5 mΩ (при AC 1000 Hz); габарити 210 x 128 x 7 mm и тегло 353 g [7].

В областта на свръхвисокочестотната техника (СВЧ) световни производители предлагат GaN транзистори в честотен диапазон С (4–8 GHz) с мощност 80 W в непрекъснат режим [12]. На (Фиг. 9) по честота и мощност са сравнени различни полупроводници за СВЧ. На Фиг. 8 са сравнени полупроводници по съпротивление в отпушено състояние (R_{on}) и пробивно напрежение в ключов режим. Вижда се от Фиг. 8 и Фиг. 9, че GaN приборите са перспективни в силовата електроника. Разновидността на GaN транзистори основани на AlGaIn/GaN хетероструктура имат висока подвижност на електроните (HEMT) и добри параметри. В GaN HEMT се използва двумерен газ (2DEG) имащ висока плътност. Той се намира в граничния слой между зоните с AlGaIn и GaN, под въздействието на естествения ефект на поляризация и пиезоелектричния ефект. При GaN HEMT на порядък е по-ниско R_{on} , което позволява намаляване на системите за охлаждане на транзистора и по-висок КПД. В СВЧ диапазона до 20 GHz GaN HEMT работят успешно в клас АВ. Например GaN HEMT NC41628S-910P150 при изходна мощност 150 W и при 20 GHz има КПД = 43 %. А транзистор CGHV59350 има изходна мощност 400 W при 5,9 GHz и КПД = 60 %. Използва се в доплеровските метеорологически радиолокатори. Компаниите International Rectifier (IR) и Efficient Power Conversion (EPC) реализират проектите GaNpowIR и eGaN, съответно [12].

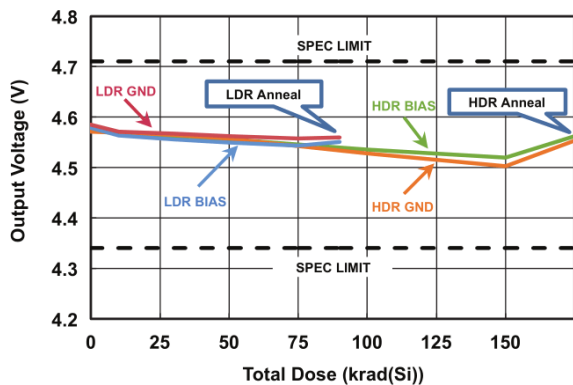
Има характеристики на GaN FET, които са добри за използване в захранващите устройства на спътници: присъща им е радиационна толерантност; малък размер на кристала; липса на паразитен p-n диод и бързо превключване; увеличена ефективност и по-малък общ размер. За разлика от силициевите MOSFETs, GaN FET нямат слой оксид и затова гама радиацията не образува капани (дупки) [13]. GaN FET също се справят добре при тестване с ефекти на единични събития (SEE). На орбита, компонентите на спътниците трябва да работят при: продължително излагане на ниска доза (LDR), обща йонизираща доза (TID) и при взаимодействия с йонизирани частици (тежки йони). Дозата TID се дели на ниска (LDR TID) с $<10 \text{ mrad(Si)/s}$ и висока (HDR TID) с $50\text{--}300 \text{ rad(Si)/s}$. За интегралната схема (гейтов драйвер) ISL70040SEH при изпитания от $86 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{mg}$, липсват еднократни преходни събития, записани при статичен вход и динамичен вход с честота от 500 kHz , където събитията се определят като $\pm 20 \text{ ns}$ смущение в широчината на импулса, защото кристалът му има много малко напречно сечение $\leq 1,7 \times 10^{-6} \text{ cm}^2$ [13]. На Фиг. 10 и Фиг. 11 са дадени резултатите от теста на чип ISL70040SEH при въздействие с дози на облъчване тип LDR TID и HDR TID.



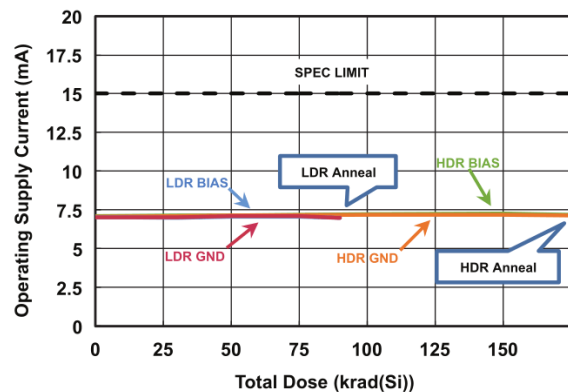
Фиг. 8. Сравнение на полупроводници по R_{on} [11]



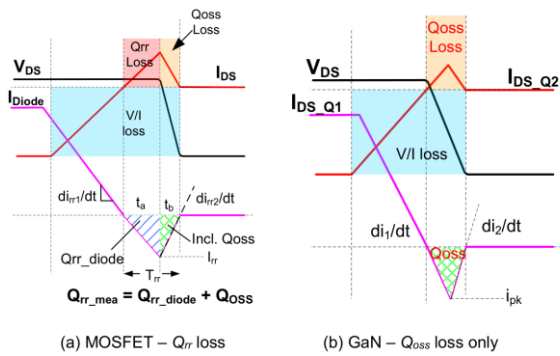
Фиг. 9. Полупроводници за СВЧ [12]



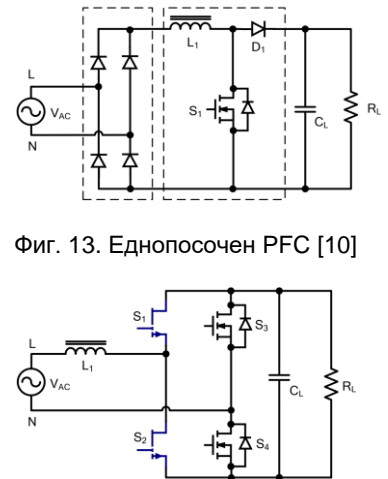
Фиг. 10. Изходно напрежение на чип ISL70040SEH при LDR TID и HDR TID въздействия [14]



Фиг. 11. Ток на консумация на чип ISL70040SEH при LDR TID и HDR TID въздействия [14]



Фиг. 12. Полумостова схема с MOSFET и GaN транзистори [10]

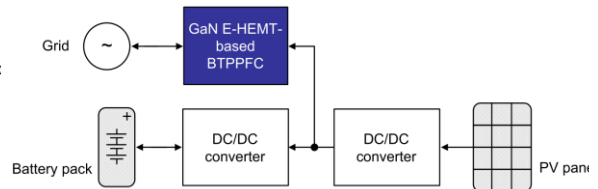


Фиг. 13. Еднопосочен PFC [10]

Фиг. 14. Двупосочен PFC [10]



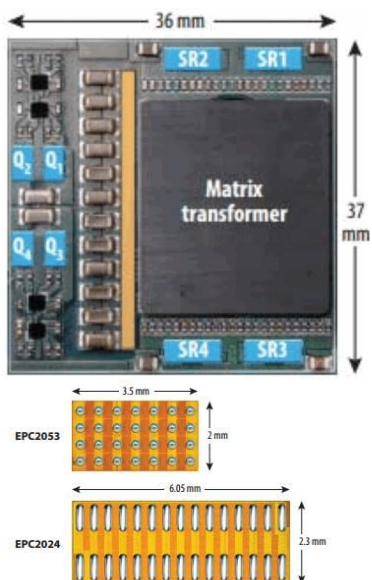
Фиг. 15. Двупосочно преобразуване генератор-акумулатор реализиран с двупосочен PFC [10]



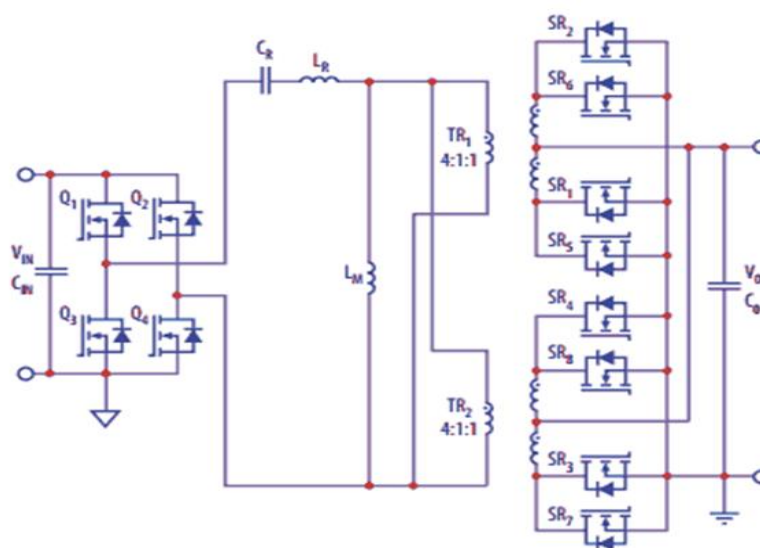
Фиг. 16. Двупосочно преобразуване генератор-акумулатор-фотоволтаик с двупосочен PFC [10]

На Фиг. 12 са сравнени две времедиаграми на: дрейновото напрежение V_{ds} ; дрейновия ток I_d и тока на диода I_{ds} при полумостова схема, която е натоварена с индуктивност и е изпълнена с MOSFET и GaN транзистори [10]. Изводът от графиката е, че при GaN транзисторите липсват динамичните загуби Q_{rr} присъщи на обратният диод при MOSFET транзисторите. Практически GaN транзисторът е толерантен към индуктивен товар и значително по-слабо загрява спрямо MOSFET. Това свойство се използва в схемата на Фиг. 14, където двата ключови GaN HEMT (S_1 и S_2) работят с висока работна честота, а двата ключови MOSFET (S_3 и S_4) работят с ниска мрежова работна честота. Новото схемно решение на двупосочен PFC (Фиг. 14) има редица предимства пред класическото такова с еднопосочен PFC (Фиг. 13).

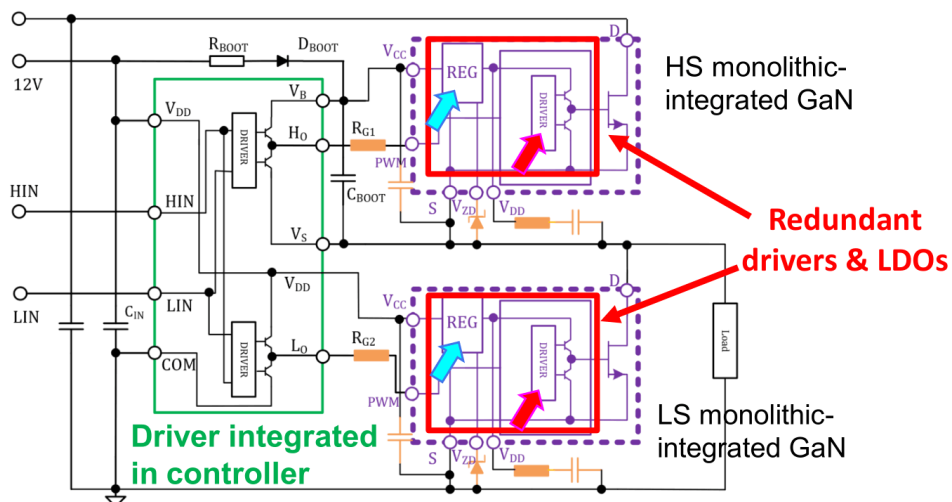
На Фиг. 17 [14] е даден перспективен DC/DC преобразувател 900 W, с КПД = 98,4 % и работна честота 1 MHz, изпълнен с eGaN-транзистори EPC2053 и EPC2024 по схемата на пълнен мост и синхронен изправител (Фиг. 18) [14]. От обем 1 cm^3 са получени 91 W при галванично разделяне на входното от изходното напрежение. Тази GaN технология е добра за вторични електрозахранвания с аерокосмическо приложение.



Фиг. 17. Външен вид на LLC конвертор с eGaN-транзистори



Фиг. 18. Схема на LLC конвертор, 900 W, $V_{in} = 48\text{ V}$, $V_{out} = 12\text{ V}$ [14]



Фиг. 19. Полумостова схема с GaN транзистори с вграден драйвер [9]

Приложения на схемни и структурни решения на захранващи системи

Предлага се приложение на три модула, изпълнени с GaN HEMT с двупосочна схема на PFC (ВТРПFC) в хибридно захранване на дроне, като във всяка фаза на мотор-генератора се използва по един модул, а изходите на модулите са паралелно свързани към акумулаторната батерия. Идеята е показана на Фиг. 15, където се реализират двете функции на мотор-генератор на електродвигател с ротор от постоянни магнети например. В режим стартер на двигателя с вътрешно горене (той не е даден на тази фигура) енергията се взема от акумулатора, а след това мотор-генераторът зарежда акумулатора. За драйверна схема и GaN HEMT в трите модула се предлага схемата от Фиг. 19.

За наземни фотоволтаици, или аерокосмически електрозахранващи системи перспективна е и схемата от Фиг. 16, при която: мрежата (или мотор-генераторът) дава или получава енергия; фотоволтаикът дава енергия и акумулаторът дава или съхранява енергия. Тази схема работи и при чисто електрически планери с голяма площ на крилето (върху които са монтирани фотоволтаици), а също така и при сателити с орбита, която ги вкарва за дълго в сянката на Земята.

Заклучение

Възможни приложения на изброените нови технологии в аерокосмическите изследвания:

- миниатюризация на управление на електродвигатели;
- преобразуватели за съхраняване на енергия;
- хибридни електрозахранвания;
- климатични системи;
- компактни DC/DC преобразуватели и фотоволтаици;
- висока устойчивост на йонизиращи фактори (слънчева радиация).

Литература:

1. GALLIUM NITRIDE: THE SILICON OF THE 21ST CENTURY
<http://www.gantechology.com/technology>
2. SCiB™ Rechargeable Battery – TOSHIBA
<https://www.scib.jp/en/product/index.htm>
<https://www.scib.jp/en/download/ToshibaRechargeableBattery-en.pdf>
https://ru.wikipedia.org/wiki/Литий-титанатный_аккумулятор
3. Сибиряков, Р. В., Кудрявцев Е. Н., Агафонов Д. В., Нараев В. Н., Пиролитический синтез анодного материала $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ из титанилкарбоксилата лития, Современные проблемы науки и образования, Издательство: Издательский Дом "Академия Естествознания" (Пенза), eISSN: 2070–7428, статья в журнале Номер: 5 Год: 2012, Стр.: 329
<https://elibrary.ru/item.asp?id=18319228>
<http://www.science-education.ru/pdf/2012/5/7073.pdf>
4. Enbo Zhao, Chuanli Qin, Hong-Ryun Jung, Gene Berdichevsky, Alper Nese, Seth Marder, Gleb Yushin, Lithium Titanate Confined in Carbon Nanopores for Asymmetric Supercapacitors ACS Nano 2016, 10, 4, 3977–3984, Publication Date: March 7, 2016
<https://doi.org/10.1021/acs.nano.6b00479>
<https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/acs.nano.6b00479>
5. Литий-ионные аккумуляторы системы LMO - $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ (литий-титанат)
<http://akb-energy.ru/rus/produkti/litii-ionnie-akkumulyatori-sistemi-lifepo4--li4ti5o12-litii-titanat/>
6. MP & VL Batteries for launchers
<https://www.saftbatteries.com/products-solutions/products/mp-vl-batteries-launchers?text=&tech=&market=331&sort=newest&submit=Search>
7. Карбоновые титанатные аккумуляторы CrbTi-3721 3.7V 21Ah 78Wh
<https://greent.com.ua/akkumulyatory/akkumulyator-carbon-titanat-titanat-crbti-3746-37v-45ah-166>
8. Lithium Titanate Battery LTO; EVLITHIUM LIMITED
<http://www.evlithium.com/Lithium-Titanate-Battery-LTO/>
9. GN010 Application Note EZDriveSM Solution for GaN Systems' E-HEMT
https://gansystems.com/wp-content/uploads/2018/12/GN010-EZDrive-Solution-for-GaN-Systems-E-HEMTs-_20181221.pdf
10. High Efficiency CCM Bridgeless Totem Pole PFC Design using GaN E-HEMT
<https://gansystems.com/wp-content/uploads/2018/01/GS665BTP-REF-rev170905.pdf>
12. Кулиев, М. В., Обзор современных GaN транзисторов и направления развития, Электронная техника. Серия 2 Полупроводниковые приборы. Выпуск 2 (245) 2017, с. 18–28, УДК 621.382
https://docviewer.yandex.ru/view/0/?page=1&*%0qNqZBht2UzUUfdviapxOIJk1
13. Kiran Bernard, Advantages of Using Gallium Nitride FETs in Satellite Applications, White Paper, February, 2018, pp. 1–7.
<https://www.renesas.com/eu/en/doc/whitepapers/rad-hard/advantages-of-using-gan-fets-in-satellite-applications.pdf>
14. Полевые транзисторы eGaN® позволяют достичь в резонансном LLC-конвертере 48...12 В КПД 98%
<https://www.terraelectronica.ru/news/5979>