

УДК 621.314.1

Шифр специальности ВАК: 2.4.1

Е.С. Полынцев, А.И. Бартенев, И.Ю. Кодорова, А.А. Аксёнов, В.А. Кагадей

Высокоплотный DC-DC-преобразователь на основе силовых GaN-микросборок для применения в автономных системах электропитания

Актуальность. Автономные системы электропитания аппаратуры космических аппаратов и беспилотных летательных аппаратов нуждаются в импульсных вторичных источниках питания, характеризующихся повышенной плотностью мощности. Рост плотности мощности может быть достигнут путем повышения КПД и снижения габаритов электронных компонентов DC-DC-преобразователей. Применение силовых GaN-транзисторов и микросборок на их основе открывает новые перспективы к росту частоты преобразования, и как следствие снижению габаритов и росту плотности мощности DC-DC-преобразователей. **Цель исследования.** Создание и экспериментальное исследование высокоплотного прямоходового DC-DC-преобразователя с активным клампом и синхронным выпрямителем на основе силовых GaN-микросборок, который предназначен для применения в автономных системах электропитания. **Методы.** Проведено моделирование DC-DC-преобразователя в LTspice. С использованием современного измерительного оборудования верифицирован макет DC-DC-преобразователя. **Научная новизна.** Впервые представлено техническое решение прямоходового высокочастотного DC-DC-преобразователя с активным клампом на основе силовых GaN-микросборок, применение которых позволило повысить плотность мощности. **Результаты.** Выполнена настройка режима работы DC-DC-преобразователя с выходным напряжением 12 В, в результате которой достигнута его стабильная работа на частоте 800 кГц в диапазоне входного напряжения 18–36 В при мощности нагрузки до 72 Вт. Во всем диапазоне входного напряжения КПД превышал 90%. Созданный DC-DC-преобразователь имел плотность мощности 4,77 кВт/дм³. Выполнено сравнение достигнутых параметров DC-DC-преобразователя с серийно выпускаемыми аналогами на основе кремниевых силовых приборов и аналогами на основе силовых нитрид галлиевых приборов, представленными в научных публикациях. **Практическая значимость.** Применение созданного высокоплотного DC-DC преобразователя в автономных системах питания радиотехнической аппаратуры космических аппаратов и беспилотных летательных аппаратов позволит увеличить их плотность мощности.

Ключевые слова: GaN, прямоходовой преобразователь, высокоплотный DC-DC-преобразователь, высокочастотный DC-DC-преобразователь, силовые GaN-микросборки, плотность мощности, удельная мощность.

DOI: 10.21293/1818-0442-2026-29-1-185-192

Введение

Современные автономные системы электропитания радиотехнической аппаратуры космических аппаратов (КА) и беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) предъявляют жесткие требования к миниатюризации и энергоэффективности импульсных источников питания (ИИП) [1, 2]. Рост плотности мощности ИИП может быть достигнут за счет увеличения коэффициента полезного действия (КПД) и, как следствие, выходной мощности, а также за счет увеличения рабочей частоты, что позволяет снизить габариты пассивных фильтрующих компонентов, а также силового трансформатора. Долгие годы одновременное увеличение КПД и рабочей частоты было невозможно из-за низкой скорости переключения кремниевых силовых приборов, в которых рост частоты неизменно сопровождался ростом динамических потерь и снижением КПД [3, 4]. Появление нового типа силовых приборов на основе GaN способствует преодолению этого барьера и позволяет создавать ИИП, работающие на частотах более 500 кГц с КПД более 90%, что открывает возможности для роста их удельной плотности мощности [4, 5].

Силовые гетероструктурные GaN-транзисторы с высокой подвижностью электронов, по сравнению с кремниевыми полевыми транзисторами, обладают рекордно низким сопротивлением открытого канала при малой емкости затвора, что позволяет им пере-

ключаться за время, измеряемое единицами наносекунд [6]. Как следствие, такие транзисторы могут быть использованы в ИИП, работающих на частотах до единиц мегагерц с повышенным КПД [7, 8].

В научных публикациях описаны технические решения, позволяющие создать низковольтные гальванически изолированные однотактные DC-DC GaN-преобразователи с активным клампом [9–12]. Применение активного клампа в однотактных DC-DC-преобразователях на основе GaN является наиболее перспективным и эффективным решением для ограничения коммутационных перенапряжений, возникающих между стоком и истоком силового транзистора при его закрытии, особенно при высоких рабочих частотах, так как он не приводит к снижению КПД [12]. Обратноходовые DC-DC-преобразователи с активным клампом, описанные в работах [9, 10], имели рабочую частоту более 1 МГц при КПД более 85%. Прямоходовой DC-DC-преобразователь с активным клампом и синхронным выпрямителем, описанный в работе [12], имел рабочую частоту до 200 кГц и КПД до 90%.

Ранее в работах [13, 14] нами была описана концепция и представлены результаты моделирования силовых GaN-микросборок (МСБ) на основе керамических плат с переходными металлизированными отверстиями, которые позволяют снизить тепловое

сопротивление и обеспечивают низкую паразитную индуктивность силового контура GaN-транзистора. Применение МСБ открывает новые перспективы для построения высокоплотных ИИП. В работе [15] представлены результаты разработки и моделирования высокочастотного прямоходового DC-DC-преобразователя с активным клампом и синхронным выпрямителем на основе МСБ. В качестве ШИМ-контроллера использовался LM5025. В составе МСБ полумоста в первичной части применялись GaN-транзисторы EPC2052, а в составе МСБ синхронного выпрямителя – EPC2016C.

Управление синхронным выпрямителем было реализовано от отдельных обмоток трансформатора, с помощью самоуправляемой схемы на основе дискретных *n*-MOSFET, что позволило отказаться от применения специализированного SR-контроллера во вторичной части (ввиду отсутствия доступных решений с рабочей частотой 1 МГц и совместимых с GaN-транзисторами по напряжению). Трансформатор был реализован по планарной технологии на основе ферритового сердечника типоразмера ELP18 из материала PC200. По результатам моделирования преобразователь имел рабочую частоту 1 МГц, выходное напряжение 12 В, диапазон входного напряжения 18–36 В, выходную мощность 72 Вт.

Целью настоящей работы являлось создание и экспериментальное исследование высокоплотного прямоходового DC-DC-преобразователя с активным клампом и синхронным выпрямителем на основе МСБ, который предназначен для применения в автономных системах электропитания радиотехнической аппаратуры КА и БПЛА, а также сравнение его с аналогами на основе Si полупроводниковых приборов, выпускаемыми серийно, и аналогами на основе GaN-приборов, описанными в литературе.

Материалы и методы исследований

Методика моделирования DC-DC-преобразователя. Моделирование прямоходового DC-DC-преобразователя с активным клампом и синхронным выпрямителем выполнялось в среде моделирования электронных схем LTspice. Моделирование выполнялось во временной области до выхода на установившийся режим. На рис. 1 представлена имитационная модель DC-DC-преобразователя [15]. Для моделирования использовались верифицированные модели силовых GaN-транзисторов EPC2052 (в первичной части) и EPC2016C (во вторичной части). Планарный трансформатор имел соотношение витков 3:4 и значение $Al = 1300$ нГн/виток².

Моделирование выполнялось на частоте 800 кГц. В ходе моделирования были получены осциллограммы напряжений в контрольных точках DC-DC-преобразователя, к которым относились: SW – средняя точка полумоста на основе транзисторов VT1 и VT2 в первичной части преобразователя; SR1 – сток транзистора синхронного выпрямителя VT3; SR2 – сток транзистора синхронного выпрямителя VT4; LOAD – напряжение на нагрузке. Все контрольные точки отмечены на рис. 1. На основе осциллограмм токов и напряжений в данных контрольных точках выполнялся анализ режима работы DC-DC-преобразователя и оценивался его КПД.

Методика изготовления силовых GaN-микросборок. Изготовление МСБ выполнялось в три этапа.

На первом этапе методом лазерной абляции формировалась электрическая разводка с двух сторон заготовки, а в обратной стороне платы формировались глухие переходные отверстия. Далее на металлизацию платы наносилось финишное покрытие типа иммерсионное никель-золото (ENIG).

На втором этапе выполнялась металлизация переходных отверстий с использованием медного микрофиллера и серебросодержащей паяльной пасты WNB-217 с температурой плавления 217 °С. Контроль качества заполнения отверстий осуществлялся с помощью рентгеновской томографии. На третьем этапе осуществлялся монтаж чип-компонентов на лицевую поверхность керамической платы.

Методика изготовления макета DC-DC преобразователя. Сборка макета DC-DC-преобразователя выполнялась по стандартной технологии поверхностного монтажа компонентов на печатные платы. Сборка макета осуществлялась вручную. Пайка осуществлялась в четыре этапа. На первом этапе монтировались чип-компоненты, расположенные на лицевой стороне печатной платы преобразователя. На втором этапе монтировались чип-компоненты, расположенные на обратной стороне печатной платы преобразователя.

На третьем этапе осуществлялась пайка МСБ и радиаторов. На четвертом этапе выполнялся монтаж планарного трансформатора. Пайка электронных компонентов осуществлялась с использованием серебросодержащей паяльной пасты INDIUM NC-SMQ92J (Sn_{0,62}/Pb_{0,36}/Ag_{0,02}, тип 3) с температурой плавления 179 °С. Паяльная паста наносилась на печатную плату с помощью ручного дозатора.

Методика экспериментального исследования DC-DC-преобразователя заключалась в измерении напряжения в его контрольных точках в ходе его работы в стационарном состоянии, а также в расчете его КПД при различном входном напряжении. На рис. 2 представлена принципиальная схема измерений осциллограмм напряжений в контрольных точках макета DC-DC-преобразователя.

Питание DC-DC-преобразователя осуществлялось от лабораторного источника-измерителя GW Instek GPP-74323; в качестве электронной нагрузки использовалась Rigol DL3031A; в качестве осциллографа – Rigol MSO8064. Измерение входного и выходного напряжения DC-DC-преобразователя осуществлялось методом Кельвина для исключения влияния падения напряжения на силовых кабелях. КПД оценивался как отношение выходной мощности преобразователя к потребляемой.

Измерения проводились при номинальной мощности нагрузки 72 Вт и при номинальном выходном напряжении 12 В.

Контроль температуры составных частей макета DC-DC-преобразователя в стационарном состоянии производился с помощью ИК-тепловизора testo 875i через 17 мин после подачи питания. Температура окружающей среды составляла 23°.

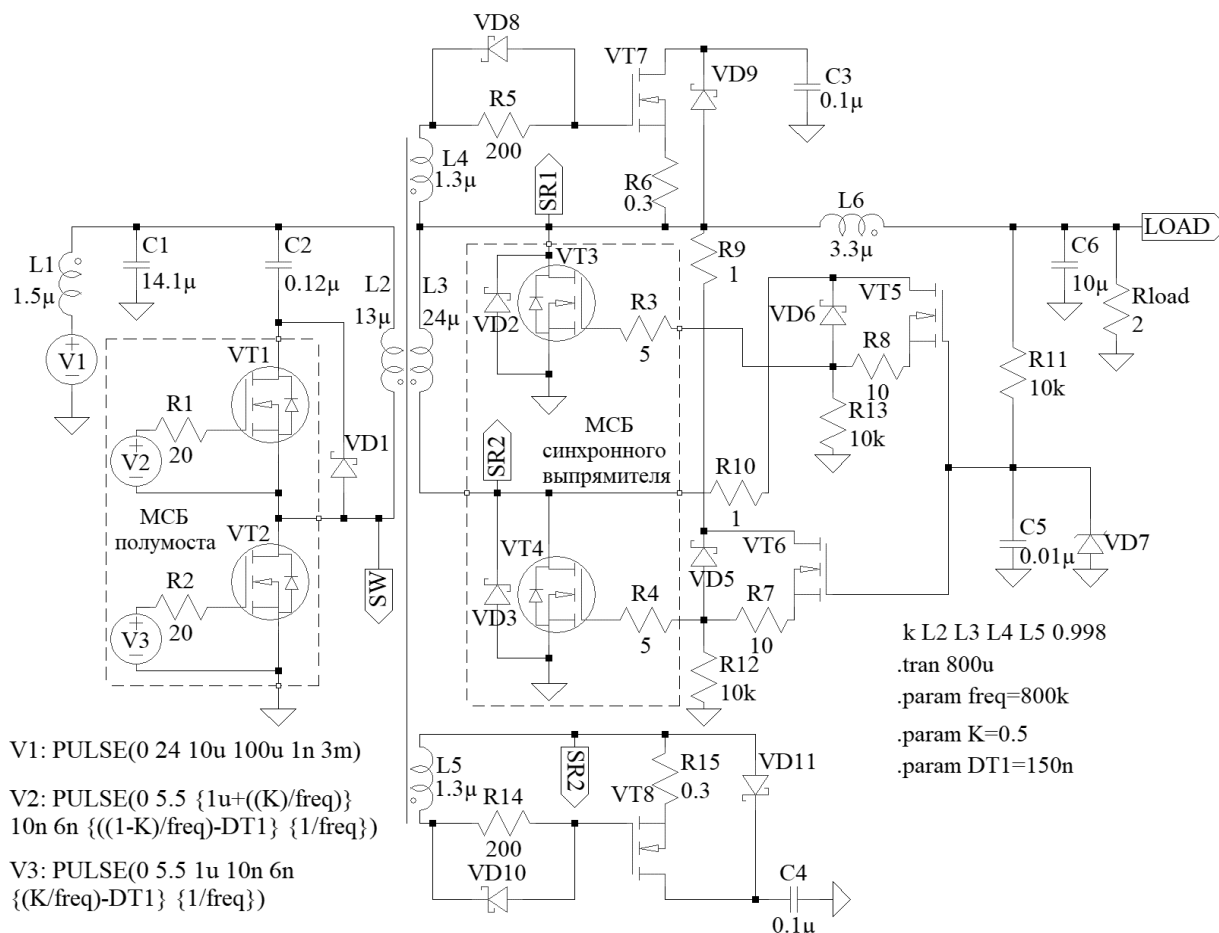


Рис. 1. Имитационная модель DC-DC-преобразователя в LTspice

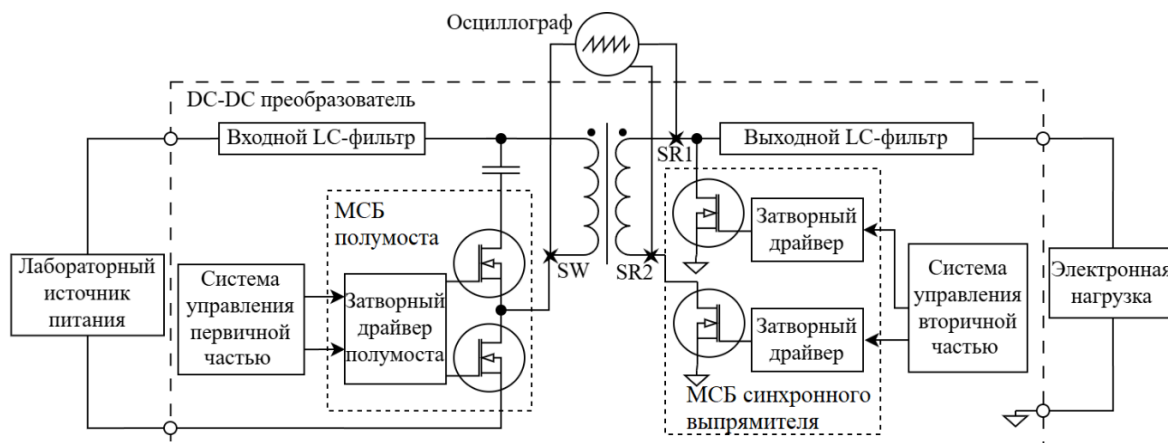


Рис. 2. Схема, использованная для измерения параметров DC-DC-преобразователя

Результаты

На рис. 3 представлен внешний вид макета высокоплотного DC-DC-преобразователя, который на данном этапе имел бескорпусное исполнение.

Разработанный макет DC-DC-преобразователя имел максимальную толщину 7 мм без учета радиаторов, а с учетом радиаторов 9,2 мм.

Масса макета в бескорпусном исполнении составила 22 г. При дальнейшей упаковке в металлический корпус предполагается, что его размер составит не более 58×29×9 мм, объем 15,1 см³.

В результате настройки макета DC-DC-преобразователя была достигнута его стабильная работа с выходным напряжением 12 В на частоте 800 кГц при мощности нагрузки 72 Вт во всем диапазоне входного напряжения.

В ходе работы DC-DC-преобразователя его пульсации выходного напряжения не превышали 60 мВ.

На рис. 4 представлены осциллограммы в контрольных точках DC-DC-преобразователя в ходе его работы в стационарном режиме при входном напряжении 24 В и мощности нагрузки 72 Вт, полученные в результате моделирования и экспериментальных измерений.

Силовая GaN микросборка полумоста

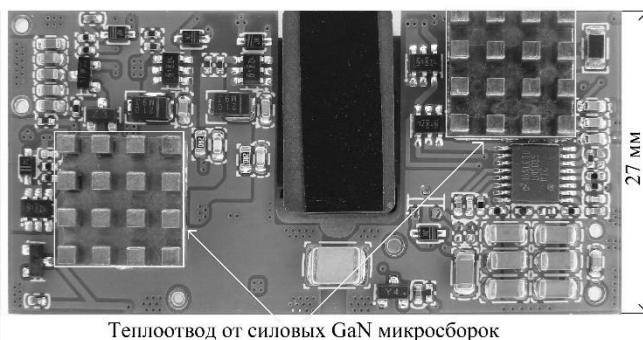
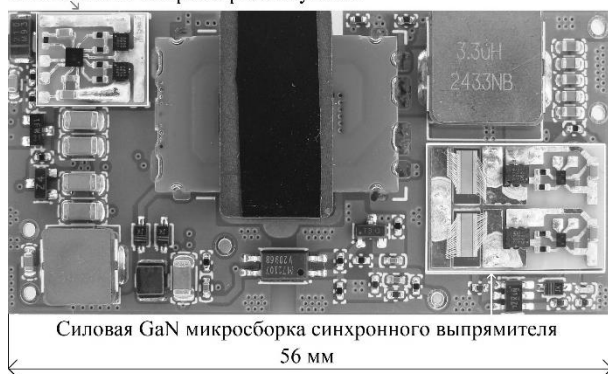


Рис. 3. Внешний вид макета высокоплотного DC-DC-преобразователя на основе силовых GaN-микросборок

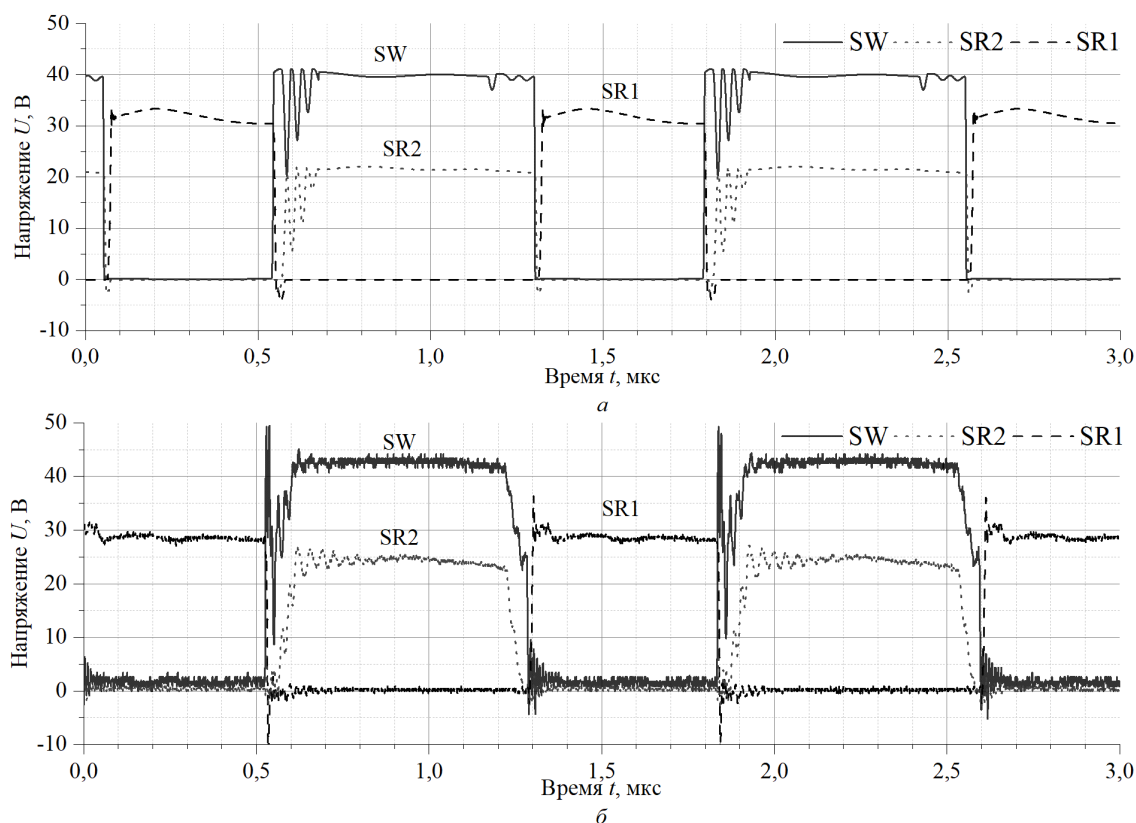


Рис. 4. Осциллограммы напряжений в контрольных точках SW, SR1, SR2 DC-DC-преобразователя в ходе его работы в стационарном режиме при выходной мощности 72 Вт и входном напряжении 24 В:

а – осциллограммы, полученные в ходе моделирования; б – осциллограммы, полученные экспериментально

Следует отметить, что по сравнению с предварительными результатами моделирования [15], где рабочая частота составляла 1 МГц, при изготовлении и отладке физического макета частота преобразования была снижена до 800 кГц. Данное решение обусловлено необходимостью компенсации влияния паразитной индуктивности печатной платы, которые приводили к нестабильной работе схемы активного клампа и локальному перегреву ключей.

Из рис. 4 видно, что осциллограммы, полученные в результате моделирования, по форме и амплитуде согласовывались с результатами измерений.

Из рис. 4, б видно, что в первичной части преобразователя в контрольной точке SW сигнал имел пря-

моугольную форму, что свидетельствовало об эффективной работе активного клампа. В момент между закрытием основного транзистора прямоходового преобразователя VT2 и открытием транзистора активного клампа VT1 на средней точке микросборки наблюдались колебания напряжения амплитудой до 50 В, которые обусловлены низкой индуктивностью рассеяния первичной обмотки трансформатора. Однако после открытия транзистора активного клампа VT1 напряжение стабилизировалось на уровне 43 В. Во вторичной части преобразователя также наблюдались прямоугольные импульсы. При открытии транзистора VT3 в контуре синхронного выпрямителя SR1 возникал выброс напряжения амплитудой до

37 В, после чего напряжение в контуре стабилизировалось на уровне 29 В за счет работы активного снаббера на основе VT7 и C3. В контуре SR2 напряжение не превышало 27 В.

С помощью ИК-тепловизора были измерены температуры основных компонентов DC-DC-преобразователя в нормальных климатических условиях лаборатории 23° при номинальном входном напряжении и максимальной выходной мощности. ИК-термограммы представлены на рис. 5. Самым термонагруженным компонентом являлся кристалл транзистора VT2, его температура достигала 120°. Транзистор VT1 имел температуру 109°, транзисторы VT3 и VT4 – около 88°, феррит планарного трансформатора – 80°. Радиаторы микросборок имели температуру 80 и 66°, для первичной и вторичной частей соответственно.

По результатам измерений КПД макета DC-DC-преобразователя была получена его зависимость от входного напряжения, представленная на рис. 6. Максимальный КПД DC-DC-преобразователя величиной 91,7% был достигнут при входном напряжении 18 В. С ростом входного напряжения КПД DC-DC-преобразователя снижался и достиг минимального значе-

ния 90% при напряжении 35,3 В. Полученная величина КПД и характер зависимости отличаются от полученных в [15], так как имитационная spice-модель не учитывала потери в ферромагнетиках, паразитные индуктивности печатной платы и нагрев электронных компонентов в ходе работы.

Разработанный макет DC-DC-преобразователя имел не вполне оптимальную топологию разводки печатной платы в первичной части, из-за чего потери и как следствие рабочая температура ключа VT2 были высоки. В дальнейшем, при оптимизации топологии печатной платы потери в первичной части преобразователя могут быть снижены.

Сравнение с аналогами

В таблице приведено сравнение параметров макета GaN DC-DC-преобразователя с близкими аналогами, описанными в научной литературе. Из данных, приведенных в таблице, видно, что разработанный макет DC-DC-преобразователя демонстрирует наиболее высокую частоту преобразования среди аналогов с прямоходовой схемотехникой. Достигнутый КПД при этом находится на среднем уровне, характерном для преобразователей подобного класса.

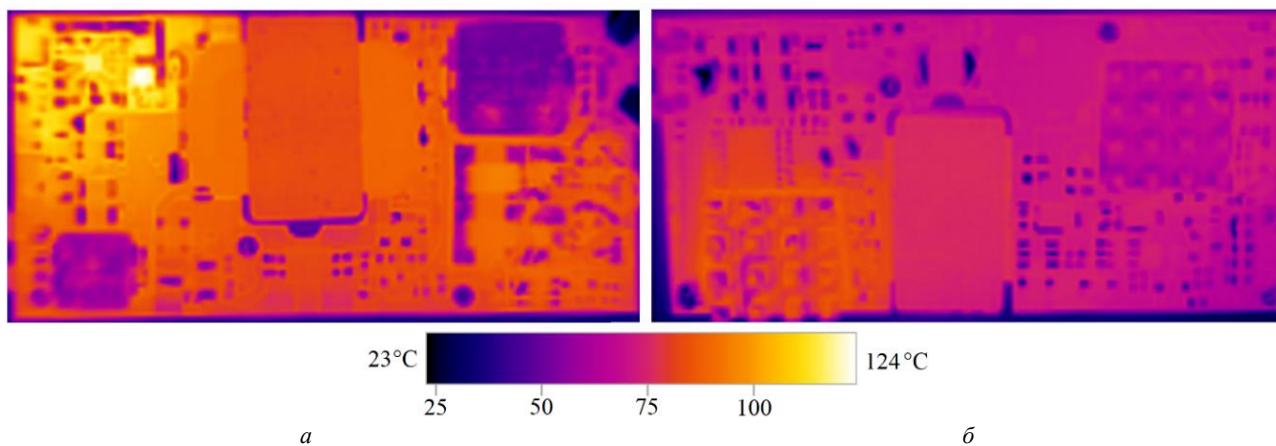


Рис. 5. ИК-термограммы, характеризующие распределение температуры в DC-DC-преобразователе: а – вид со стороны силовых GaN-микросборок; б – вид со стороны радиаторов

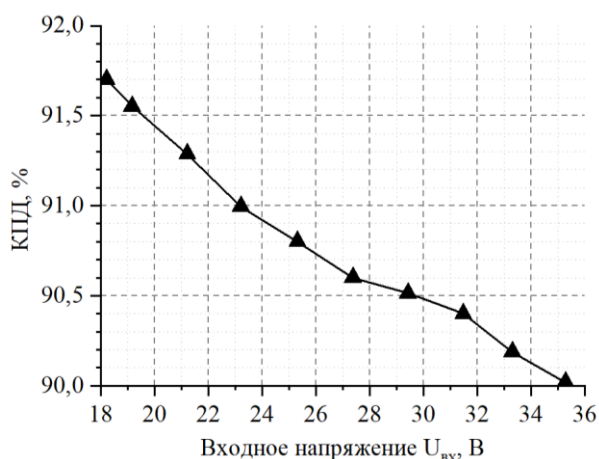


Рис. 6. Зависимость измеренного КПД макета DC-DC-преобразователя от входного напряжения

При дальнейшем корпусировании макета разработанного DC-DC-преобразователя, его объем составил бы 15,1 см³. При максимальной мощности нагрузки 72 Вт, удельная плотность мощности DC-DC-преобразователя на единицу объема достигала 4,77 кВт/дм³. Это на 20% больше по сравнению с близким серийно выпускаемым кремниевым аналогом URB2412LD-60WR3 производства «Morsun», который имел выходную мощность 60 Вт, максимальный КПД 93%, габариты 5,08×2,54×1,18 см и плотность мощности 3,95 кВт/дм³. В сравнении с близким отечественным серийно выпускаемым аналогом МДМ75-1Ш12 с выходной мощностью 75 Вт, типовым КПД до 87%, габаритами 5,75×3,32×1,02 см и плотностью мощности 3,84 кВт/дм³ разработанный DC-DC-преобразователь имеет преимущество в плотности мощности порядка 24%.

Сравнение макета GaN DC-DC-преобразователя с близкими аналогами, описанными в научной литературе

Авторский коллектив и год публикации	Тип преобразователя	Входное напряжение, В	Выходное напряжение, В	Выходная мощность, Вт	Частота преобразования, МГц	Максимальный КПД, %
Virginia Tech [9]	Обратноходовой с активным клампом	~110	19,5	65	1,2	92,8
SUIT [10]	Обратноходовой с активным клампом и синхронным выпрямителем	23–47	5	30	1,0	85,93
Gazi University [11]	Прямоходовой с активным клампом	18–50	15	200	0,5	96
Thales Alenia Space [12]	Прямоходовой с активным клампом и синхронным выпрямителем	100	5, +/-18	52	0,2	90
Данная работа	Прямоходовой с активным клампом и синхронным выпрямителем	18–36	12	72	0,8	91,7

Заключение

Таким образом, созданный и экспериментально исследованный макет высокоплотного прямоходового DC-DC-преобразователя с активным клампом и синхронным выпрямителем на основе МСБ существенно превосходит описанные в литературе схемотехнические аналоги на основе силовых GaN-транзисторов по частоте преобразования. По сравнению с близкими серийными аналогами на основе кремния, разработанный высокоплотный DC-DC-преобразователь превосходит отечественный аналог по КПД на 4%, а по плотности мощности на 24%. Достигнутые характеристики преобразователя позволяют сделать вывод о перспективности его применения в составе автономных систем электропитания радиотехнической аппаратуры космических аппаратов и беспилотных летательных аппаратов.

Литература

1. Projecting power converter specific power through 2050 for aerospace applications / C. Hall, C.L. Pastra, A. Burrell, J. Gladin, D.N. Mavris // 2022 IEEE Transportation Electrification Conference & Expo (ITEC). – Anaheim, California: IEEE, 2022. – P. 760–765.
2. Development of a high power density drive system for unmanned aerial vehicles / M. Schiestl, F. Marcolini, M. Incurvati, F.G. Capponi, R. Stärz, F. Caricchi // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2020. – Vol. 36. – No. 3. – P. 3159–3171.
3. Беспалов В. Нитрид галлия: новый подход для эффективного преобразования электроэнергии / В. Беспалов, В. Егоркин, М. Журавлев // Электроника: наука, технология, бизнес. – 2022. – Вып. 3. – С. 150–157.
4. Review and outlook on GaN and SiC power devices: Industrial state-of-the-art, applications, and perspectives / M. Buffolo, D. Favero, A. Marcuzzi, C. De Santi, G. Meneghesso, E. Zanoni, M. Meneghini // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2024. – Vol. 71, No. 3. – P. 1344–1355.
5. Исследование ионной имплантации азота через слой нитрида кремния для межприборной изоляции силовых GaN/Si-транзисторов / В.И. Егоркин, С.В. Оболенский, В.Е. Земляков, А.А. Зайцев, В.И. Гармаш // Письма в Журнал технической физики. – 2021. – Т. 47, № 18. – С. 15–17.
6. A review of high-speed GaN power modules: State of the art, challenges, and solutions / A.I. Emon, Mustafeez-ul-Hassan, A.B. Mirza, J. Kaplun, S.S. Vala, F. Luo // IEEE journal of emerging and selected topics in power electronics. – 2022. – Vol. 11, No. 3. – P. 2707–2729.
7. High frequency, high efficiency, and high power density GaN-based LLC resonant converter: State-of-the-art and perspectives / S.A. Mortazavizadeh, S. Palazzo, A. Amendola, E. De Santis, D.D. Ruzza, G. Panariello, A. Sanseverino, F. Ve-

lardi, G. Busatto // Applied Sciences. – 2021. – Vol. 11, No. 23. – P. 11350.

8. Остриров В.Н. Опыт разработки источника питания бортовой сети на перспективной элементной базе / В.Н. Остриров, М.С. Яковенко, Д.В. Репецкий, К.В. Мильский, В.В. Краснов // Вестник МЭИ. – 2020. – № 4. – С. 113–121.

9. Design consideration of MHz active clamp flyback converter with GaN devices for low power adapter application / X. Huang, J. Feng, W. Du, F.C. Lee, Q. Li // 2016 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). – California, USA: IEEE, 2016. – P. 2334–2341.

10. Tong Q. Design of a synchronous rectifier flyback DC-DC converter using GaN FETs for commercial aerospace applications // 2020 IEEE 3rd International Conference on Electronics Technology (ICET). – Online: IEEE, 2020. – P. 308–313.

11. Bulut Ö. Design and loss analysis of a 200-W GaN based active clamp forward converter / Ö. Bulut, M.T. Aydemir // 2018 5th International Conference on Electrical and Electronic Engineering (ICEEE). – Istanbul, Turkey: IEEE, 2018. – P. 97–100.

12. Maqueda M.G. High Efficiency GaN Based Resonant Reset Forward Converter with Synchronous Rectification for Space Applications / M.G. Maqueda, V. Svikovic // 2023 13th European Space Power Conference (ESPC). – Alicante, Spain: IEEE, 2023. – P. 1–8.

13. Design and Optimization of 100 V GaN Multi-chip Power Micromodule Based on AlN DBC Substrate / E.S. Polyntsev, I.Y. Kodorova, A.A. Aksenov, V.A. Kagadey // 2024 IEEE 25th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM). – Altai Republic, Russia: IEEE, 2024. – P. 1180–1184.

14. Kodorova I.Y. Thermal Analysis of Packaging Solution for GaN Multi-chip Power Micromodule / I.Y. Kodorova, E.S. Polyntsev, V.A. Kagadey // 2024 IEEE 25th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM). – Altai Republic, Russia: IEEE, 2024. – P. 1230–1233.

15. High Frequency 1 MHz 72 W Forward Converter with Active Clamp and Synchronous Rectifier Based on GaN Multichip Power Micromodules / E.S. Polyntsev, A.I. Bartenev, I.Y. Kodorova, A.A. Aksenov, V.A. Kagadey // 2025 IEEE 26th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM). – IEEE, 2025. – P. 790–795.

Полынцеv Егор Сергеевич

Мл. науч. сотр. ЛИОР каф. физической электроники (ФЭ) Томского государственного ун-та систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: 0000-0003-4368-8258
Тел.: +7 (382-2) 41-48-61
Эл. почта: e.polyntsev@gmail.com

Бартенев Александр Иванович

Аспирант каф. промышленной электроники (ПрЭ)

ТУСУРа

Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050

ORCID: 0009-0009-8521-8343

Тел.: +7-906-950-11-71

Эл. почта: san4ubas@mail.ru

Кодорова Ирина Юрьевна

Инженер-электроник, АО «НПП «Радар ммс»

ул. Высоцкого, 28, стр. 3, г. Томск, Россия, 634031

ORCID: 0009-0009-8521-8343

Тел.: +7 (382-2) 61-40-00

Эл. почта: irina_tusur@mail.ru

Аксёнов Андрей Александрович

Аспирант института сильноточной электроники СО РАН

пр. Академический, 2/3, г. Томск, Россия, 634055,

Тел.: +7-905-990-57-14

Эл. почта: aksenov@mail.tsu.ru

Кагадей Валерий Алексеевич

Д-р физ.-мат. наук, проф. каф. ФЭ ТУСУРа

Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050

Тел.: +7 (382-2) 41-48-61,

Эл. почта: valerii.a.kagadei@tusur.ru

Поступила в редакцию: 07.04.2026.

Принята к публикации: 28.05.2026.

Polyntsev E.S., Bartenev A.I., Kodorova I.Y.,

Aksenov A.A., Kagadey V.A.

High power density DC-DC-converter based on GaN multi-chip power micromodule for autonomous power supply systems

Relevance. Autonomous power supply systems for spacecraft and unmanned aerial vehicles require switching mode power supplies characterized by increased power density. The increase in power density can be achieved by improving efficiency and reducing the size of electronic components in DC-DC-converters. The use of power GaN-transistors and micromodules based on them opens up new prospects for increasing the conversion frequency and, consequently, reducing the size and increasing the power density of DC-DC converters. **Purpose.** The development and experimental study of a high-power density forward DC-DC-converter with an active clamp and synchronous rectifier based on GaN multi-chip power micromodules, intended for use in autonomous power supply systems.

Methods. Simulation of the DC-DC-converter was performed using LTspice. The prototype of the DC-DC-converter was verified using modern measurement equipment. **Novelty.** A technical solution for a high-frequency forward DC-DC-converter with an active clamp based on power GaN multi-chip power micromodules is presented for the first time; their application allowed for an increase in the power density. **Results.** The operating mode of the DC-DC-converter with an output voltage of 12 V was tuned, achieving stable operation at a frequency of 800 kHz over an input voltage range of 18–36 V at a load power of up to 72 W. Over the entire input voltage range, the efficiency exceeded 90%. The developed DC-DC-converter achieved a power density of 4.77 kW/dm³. A comparison was made between the achieved parameters of the DC-DC-con-

verter and those of commercially available silicon-based counterparts, as well as GaN-based equivalents presented in scientific publications. **Practical significance.** The use of the developed high-density DC-DC-converter in autonomous power supply systems for radio equipment of spacecraft and unmanned aerial vehicles will increase their power density.

Keywords: GaN, forward converter, high power density DC-DC-converter, high-frequency DC-DC-converter, GaN multichip power micromodules, power density, specific power.

DOI: 10.21293/1818-0442-2026-29-1-185-192

References

1. Hall C., Pastra C.L., Burrell A., Gladin J., Mavris D.N. Projecting power converter specific power through 2050 for aerospace applications. 2022 IEEE Transportation Electrification Conference & Expo (ITEC), Anaheim, California, IEEE, 2022, pp. 760–765.
2. Schiestl M., Marcolini F., Incurvati M., Capponi F.G., Stärz R., Caricchi F. Development of a high power density drive system for unmanned aerial vehicles. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, vol. 36, no. 3, pp. 3159–3171.
3. Bepalov V., Egorkin V., Zhuravlev M. [Gallium nitride: a new approach for efficient power conversion]. *Electronics: Science, Technology, Business*, 2022, no. 3, pp. 150–157 (in Russ.).
4. Buffolo M., Favero D., Marcuzzi A., De Santi C., Meneghesso G., Zanoni E., Meneghini M. Review and outlook on GaN and SiC power devices: Industrial state-of-the-art, applications, and perspectives. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2024, vol. 71, no. 3, p. 1344–1355.
5. Egorkin V.I., Obolenskiy S.V., Zemlyakov V.E., Zaytsev A.A., Garmash V.I. Study of nitrogen ion implantation through Si₃N₄ layer for GaN on Si power HEMTs isolation process. *Technical Physics Letters*, 2021, vol. 48, no. 13, pp. 6–8.
6. Emon A.I., Mustafeez-ul-Hassan, Mirza A.B., Kaplun J., Vala S.S., Luo F. A review of high-speed GaN power modules: State of the art, challenges, and solutions. *IEEE journal of emerging and selected topics in power electronics*, 2022, vol. 11, no. 3, pp. 2707–2729.
7. Mortazavizadeh S.A., Palazzo S., Amendola A., De Santis E., Ruzza D.D., Panariello G., Sanseverino A., Velardi F., Busatto G. High frequency, high efficiency, and high power density GaN-based LLC resonant converter: State-of-the-art and perspectives. *Applied Sciences*, 2021, vol. 11, no. 23, pp. 11350.
8. Ostrirov V.N., Yakovenko M.S., Repetsky D.V., Miskiy K.V., Krasnov V.V. [Experience in Development of an On-Board Electric System Power Supply Based on Advanced Electronic Components]. *Vestnik Moskovskogo Energeticheskogo Instituta*, 2020, no 4, pp. 113–121 (in Russ.).
9. Huang X., Feng J., Du W., Lee F.C., Li Q. Design consideration of MHz active clamp flyback converter with GaN devices for low power adapter application. 2016 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), California, USA: IEEE, 2016, pp. 2334–2341.
10. Tong Q. Design of a synchronous rectifier flyback DC-DC converter using GaN FETs for commercial aerospace applications. 2020 IEEE 3rd International Conference on Electronics Technology (ICET), Online: IEEE, 2020, pp. 308–313.
11. Bulut Ö., Aydemir M.T. Design and loss analysis of a 200-W GaN based active clamp forward converter. 2018 5th International Conference on Electrical and Electronic Engineering (ICEEE), Istanbul, Turkey, IEEE, 2018, pp. 97–100.
12. Maqueda M.G., Svikovic V. High Efficiency GaN Based Resonant Reset Forward Converter with Synchronous Rectification for Space Applications. 2023 13th European

Space Power Conference (ESPC), Alicante, Spain, IEEE, 2023. – P. 1–8.

13. Polyntsev E.S., Kodorova I.Y., Aksenov A.A., Kagadey V.A. Design and Optimization of 100 V GaN Multi-chip Power Micromodule Based on AlN DBC Substrate. 2024 IEEE 25th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM), Altai Republic, Russia, IEEE, 2024, pp. 1180–1184.

14. Kodorova I.Y., Polyntsev E.S., Kagadey V.A. Thermal Analysis of Packaging Solution for GaN Multi-chip Power Micromodule. 2024 IEEE 25th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM), Altai Republic, Russia, IEEE, 2024, pp. 1230–1233.

15. Polyntsev E.S., Bartenev A.I., Kodorova I.Y., Aksenov A.A., Kagadey V.A. High Frequency 1 MHz 72 W Forward Converter with Active Clamp and Synchronous Rectifier Based on GaN Multichip Power Micromodules. 2025 IEEE 26th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM), Altai Republic, Russia IEEE, 2025, pp. 790–795.

Egor S. Polyntsev

Junior researcher, Department of Physical Electronics,
Tomsk State University of Control Systems
and Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenin Ave., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0000-0003-4368-8258
Phone: +7 (382-2) 41-48-61
Email: e.polyntsev@gmail.com

Aleksandr I. Bartenev

Postgraduate student, Department of Industrial Electronics,
TUSUR
40, Lenin Ave., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0009-0009-8521-8343
Phone: +7-906-950-11-71
Email: san4ubas@mail.ru

Irina Y. Kodorova

Electronics engineer, Tomsk branch of JSC «Radar mms»
28/3, Vysotskogo St., Tomsk, Russia, 634031
ORCID: 0009-0009-8521-8343
Phone: +7 (382-2) 61-40-00
Email: irina_tusur@mail.ru

Andrey A. Aksenov

PhD student, Institute of High Current Electronics SB RAS
2/3, Akademicheskoy Ave., Tomsk, Russia, 634055
Phone: +7-905-990-57-14
Email: aksenov@mail.tsu.ru

Valery A. Kagadey

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor,
Department of Physical Electronics, TUSUR
40, Lenin Ave., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 41-48-61
Email: valerii.a.kagadei@tusur.ru

Received: 07.04.2026.

Accepted: 28.05.2026.