

АРСЕНІУК ДМИТРО

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

<https://orcid.org/0000-0003-2022-0599>e-mail: arsedmitry@gmail.com

ЗІНЬКОВСЬКИЙ ЮРІЙ

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

<https://orcid.org/0000-0003-4234-3549>e-mail: yuzin@ukr.net

АНАЛІЗ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ЗВОРОТНОХОДОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ШИРОКОЗОННИХ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПРИЛАДІВ НА ОСНОВІ НІТРИДУ ГАЛІЮ

Представлені результати дослідження силових AC-DC перетворювачів, в яких силовим елементом є польовий транзистор на основі нітриду галію (GaN HEMT). Зворотногодкові перетворювачі використовуються для створення імпульсних джерел живлення, забезпечуючи високе значення коефіцієнта корисної дії (ККД) та мінімальне тепловиділення, що є центральним завданням сучасної силової електроніки. До основних проблем, що розглядаються, відносяться комутаційні втрати силового транзистора на високих частотах перемикання, в той час коли польові транзистори на основі кремнію практично вичерпали можливості вдосконалення. Використання у перетворювачі широкозонного силового транзистора створеного на нітриді галію дозволило забезпечити підвищення стабільності приладу за рахунок досягнення малих втрат на перемикання, що дає реальну можливість працювати на більш високих частотах. Також GaN HEMT мають менший час відновлення в порівнянні з іншими типами силових ключів, що в сукупності підвищує енергоефективність силових перетворювачів, це також забезпечує зменшення габаритів пристрою.

Побудована комп'ютерна модель перетворювача у середовищі LTSpice XVII з урахуванням параметрів компонентів. Отримані характеристики струмів та напруг на GaN-транзисторі, потужність розсіювання на транзисторі, вихідні характеристики приладу. За результатами моделювання, зменшення динамічних втрат та пульсацій на транзисторі при досягнутому низькому рівні тепловиділення показує перспективність використання пристрою з широкою забороненою зоною для створення високочастотних перетворювачів енергії придатних до використання у якості джерел живлення у системах, де малі габарити необхідні, такі як системи живлення малих літальних апаратів, телекомунікаційні мережі.

Ключові слова: зворотногодковий перетворювач, AC-DC, SMPS Flyback converter, нітрид галію, карбід кремнію, GaN, широкозонні напівпровідники, SPICE, LTSpice XVII, силова електроніка.

ARSENIUK DMYTRO

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

ZINKOVSKYI YURI

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

ANALYSIS AND MODELING OF FLYBACK CONVERTERS USING WIDEBAND SEMICONDUCTOR DEVICES BASED ON GALLIUM NITRIDE

This paper presents the findings from a study on AC-DC power converters, specifically focusing on those where the power element is a gallium nitride (GaN HEMT) based field-effect transistor. Flyback converters are employed in the development of pulsed power supplies, aiming for high efficiency and minimal heat generation, which are key objectives in contemporary power electronics. The study primarily addresses the challenge of switching losses in power transistors at elevated switching frequencies, an area where silicon-based field-effect transistors have nearly reached their developmental zenith.

The incorporation of a wideband power transistor based on gallium nitride in the converter has been shown to enhance device stability by achieving low switching losses. This advancement enables operation at higher frequencies. Additionally, GaN HEMTs exhibit shorter recovery times compared to other power switch types, collectively boosting the energy efficiency of power converters and facilitating a reduction in device size.

A comprehensive computer model of the converter was constructed in the LTSpice XVII, incorporating detailed component parameters. The simulation yielded data on currents and voltages across the GaN transistor, power dissipation in the transistor, and the device's output characteristics. The simulation results indicate a significant reduction in dynamic losses and pulsations on the transistor, coupled with a low level of heat generation. These findings underscore the potential of using wide bandgap devices in the creation of high-frequency energy converters. Such converters are particularly suited for applications requiring compact power sources, such as in small aircraft systems and telecommunication networks.

Keywords: flyback converters, AC-DC, SMPS, gallium nitride, GaN, wide bandgap semiconductors, SPICE, LTSpice XVII, power electronics

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

У сфері імпульсних джерел живлення, зворотногодкові перетворювачі відіграють ключову роль у ефективному перетворенні напруги та забезпеченні електричної ізоляції. Традиційні зворотногодкові перетворювачі, які зазвичай використовують кремнієві транзистори, стикаються з рядом проблем, що обмежують їхню енергоефективність та стабільність роботи. Серед цих проблем - підвищені втрати при перемиканні, особливо на вищих частотах, через повільнішу швидкість перемикання та вищий опір кремнієвих транзисторів у відкритому стані. Це веде до значного розсіювання потужності та зниження загального коефіцієнта корисної дії (ККД). Крім того, тепло, що виділяється внаслідок цих втрат, потребує

складних систем управління температурою, що збільшує навантаження та впливає на надійність та термін служби перетворювачів. Робоча частота цих перетворювачів також обмежена; робота на вищих частотах, яка бажана для зменшення розмірів пасивних компонентів, ускладнює втрати перемикавання та теплові проблеми у кремнієвих транзисторах.

Інтеграція транзисторів на основі нітриду галію (GaN) у зворотногоходові перетворювачі пропонує рішення цих обмежень. GaN-транзистори характеризуються меншими значеннями ємності та заряду, що забезпечує вищу швидкість перемикавання та значно знижує втрати при перемиканні. Це сприяє підвищенню загальної енергоефективності, особливо на високих частотах. Крім того, підвищена ефективність GaN-транзисторів знижує тепловиділення, спрощуючи управління температурним режимом та дозволяючи створювати більш компактні конструкції перетворювачів без шкоди для надійності. GaN-транзистори можуть ефективно працювати на значно вищих частотах у порівнянні з кремнієвими, що сприяє мініатюризації пасивних компонентів та призводить до створення менших, легших та ефективніших перетворювачів. Поєднання цих факторів призводить до більш високої щільності потужності зворотногоходових перетворювачів на основі GaN, роблячи їх ідеально підходящими для сучасних електричних приладів, де габарити та вага є критичними параметрами.

Аналіз досліджень та публікацій

Гнучкість використання зворотногоходових перетворювачів дозволяє використовувати їх у силових пристроях високої напруги, таких як сонячні електростанції. Так як дана топологія дозволяє ізолювати вхідну високовольтну частину і кілька низьковольтних вихідних за наявності декількох допоміжних виходів. Блок живлення потужністю 200 Вт, описаний у цій статті [1], при вхідній напрузі від 200 до 1200 В постійного струму працює на частоті комутації 65 кГц. Для покращення характеристик було запропоновано додаткову систему зворотного зв'язку та систему адаптивної модуляції. Було побудовано та випробувано прототип. При вхідній напрузі 320 електронна навантаження регулюється так, щоб вихідна потужність становила 15,95 Вт. Частота перемикавання транзистора 25 кГц, ККД 91,5%. При повному навантаженні частота комутації 66 кГц, ККД 81,1%. Вихідна пульсація 100 мВ. Застосування силових транзисторів з нітриду галію дозволить збільшити частоту комутації, зменшити розміри фільтрів і зменшити пульсації.

У статті [2] буде проаналізовано та розроблено зворотногоходовий перетворювач для широкого діапазону навантажень. Основна увага була приділена проблемі індуктивності розсіювання та пов'язаних із нею перешкод, а відповідно і вимог до системи охолодження. Перетворювач розрахований на змінну вхідну напругу 85-265В при вихідній напрузі 12В та потужності 48Вт, частота перемикавання силового ключа 100 кГц. Загальний ККД за повного навантаження становив 81%. Авторам вдалося знехтувати зовнішніми системами охолодження, що наголошувало на необхідності розробки більш компактних конструкцій для зручності використання у промисловій сфері. За результатами роботи ми можемо бачити невеликі коливання, спричинені впливом трансформатора у схемі, а також збільшення пульсацій на виході пристрою, через що виникла необхідність додаткової фільтрації. Використання транзистора з нітриду галію дозволило б знизити втрати порівняно з кремнієвим аналогом, підвищити частоту перемикавання та одночасно зменшити вплив паразитних параметрів та зменшити габарити пристрою.

У статті [3] наведено приклад використання таких перетворювачів у сонячних панелях. Автор передбачає, що переваги зворотногоходових перетворювачів, такі як кількість компонентів, що використовуються, можуть знизити виробничі витрати. Наведено аналіз моделювання пристрою з вихідною потужністю 350 Вт і частотою комутації 100 кГц. Автор зазначає, що конструкція перетворювача може бути з'єднана з інвертором для створення двокаскадного джерела живлення. Результати моделювання показують, як паразитна індуктивність впливає роботу транзистора, і навіть збільшення пульсацій на виході пристрою.

У статті [4] пропонується нове джерело живлення з одним входом та кількома виходами шляхом інтеграції зворотногоходового перетворювача та кількох понижуючих перетворювачів. Інвертор діє як головний регулятор, тоді як понижуючі перетворювачі компенсують послідовну напругу точного управління. Ця конфігурація зменшує розмір зворотногоходового трансформатора і конденсаторів, що фільтрують, і, отже, покращує загальний форм-фактор. У цій статті автор удосконалює управління перетворювачем за допомогою нової системи зворотного зв'язку, орієнтуючись на вихідні характеристики пристрою, що призводить до зниження сумарного фільтрів і самого пристрою.

До загальних висновків можна сказати, що основні недоліки таких пристроїв зводяться до впливу паразитних параметрів та втрат, які можуть лише зростати зі збільшенням частоти. Необхідність більшої кількості фільтрів значно збільшує розмір кінцевого пристрою.

Метою роботи є створення схемних та конструктивних рішень у зворотному імпульсному джерелі живлення, що забезпечують більшу, порівняно з традиційними реалізаціями, енергоефективність, надійність, щільність компоновки при менших габаритах перетворювача.

Виклад основного матеріалу

На рис. 1 зображена розроблена авторами схема зворотногоходового перетворювача з використанням нітриду галієвого транзистора.

Зворотногоходовий перетворювач в режимі перервної провідності (DCM) працює шляхом передачі енергії під час циклів включення та виключення [5, 6]. Під час циклу включення силовий транзистор відкривається, дозволяючи струму текти через первинну обмотку трансформатора. Енергія запасується в магнітному полі трансформатора. Напруга випрямляється вихідним діодом та згладжується вихідним

конденсатором, забезпечуючи вихідну напругу постійного струму. Цей режим роботи особливо корисний на більш високих частотах, оскільки він знижує втрати потужності на первинній стороні.

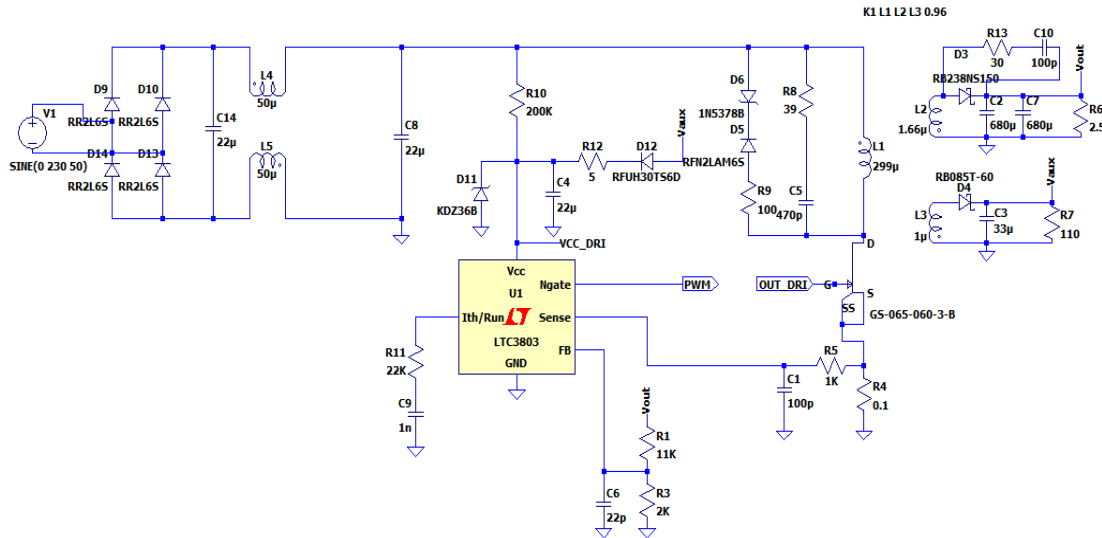


Рис. 1. Комп'ютерна модель розробленого зворотного перетворювача в LTSpice XVII

Моделювання схеми проводилося за допомогою методу SPICE для зворотного перетворювача. SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) — інструмент, який дозволяє ефективно аналізувати роботу розробленого зворотного перетворювача за різними параметрами, таких як форми сигналів напруги і струму, потужність, що розсіюється, і ККД, за різних умов навантаження.

Перетворювач розрахований на роботу в діапазоні вхідної напруги 90-230 В змінного струму і забезпечує вихідну напругу 5 В при 2 А з частотою перемикання 250 кГц. Робота приладу включає контроль за допомогою сигналу широтно-імпульсної модуляції (ШИМ) на затвор GaN-транзистора типу GS-065-060-3-В та схеми зворотного зв'язку із живленням від додаткової обмотки трансформатора. Фіксує схема стабілітрон, працює як захисний механізм для запобігання надмірних стрибків напруги на транзисторі під час фази відключення, так як основні паразитні втрати в схемі виникають на зворотному трансформаторі. Індуктивність первинної обмотки розрахована відносно мінімально необхідної енергії для роботи в заданому режимі. Схема контролю складається із зворотного контролера LTC3803. Контролер живиться з додаткової обмотки та має схему плавного пуску.

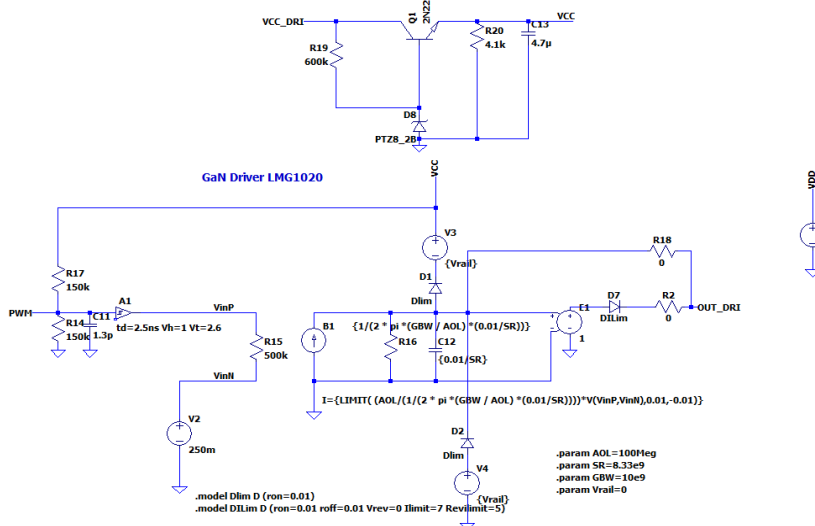


Рис. 2. Модель GaN-драйвера LMG1020 в середовищі LTSpice XVII

До недоліків швидкодіючих GaN-транзисторів можна віднести труднощі управління пристроєм при подачі керуючого сигналу на затвор транзистора, а також низькі граничну напругу та ємність на затворі транзистора, що обмежують швидкість наростання напруги і струму dV/dt і dI/dt [7], що призводить до виникнення шуму та коливань, що робить необхідним використання в конструкції приладу спеціалізованих інтегральних драйверів затворів транзистора, через який подається ШИМ-сигнал. Обираючи драйвер, необхідно звертати увагу на час включення/виключення, час затримки, частоти перемикання, оптимальну напругу включення та обмеження струму. За цими критеріями було використано драйвер типу

LMG1020, комп'ютерна модель якого зображена на рис. 2.

На рис. 3 наведено характеристики струму витоків і напруги стік-витік GaN-транзистора. Перемикання транзистора перериває струм через індуктивність розсіювання трансформатора, що викликає викид високої напруги через стік та виток польового транзистора.

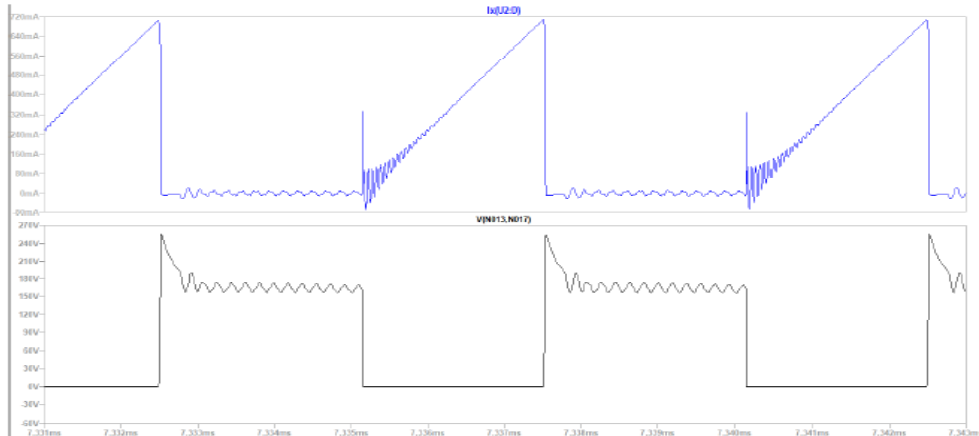


Рис. 3. Часова характеристика струму та напруги стік-витік транзистора

Резонанс, викликаний індуктивністю розсіювання трансформатора та паразитною ємністю транзистора, викликає високочастотні коливання, які оцінюються у 10-15 кГц. Мала паразитна ємність польового транзистора з нітриду галію, а також використання снаберної схеми зі стабілітрона і діода дозволили знизити навантаження на польовий транзистор, підвищивши надійність схеми, усунувши проблеми електромагнітних перешкод, викликаних високочастотними коливаннями.

Піки потужності, що спостерігаються на рис. 3, є короточасними та спричинені комутаційними втратами польового транзистора. Короточасність цього явища не впливає на загальну роботу приладу. Середня потужність, що розсіюється, становить 148 мВт. Польові транзистори на основі нітриду галію характеризуються низькими значеннями опору у відкритому стані, термічного опору через нижчі значення резистивних втрат потужності.

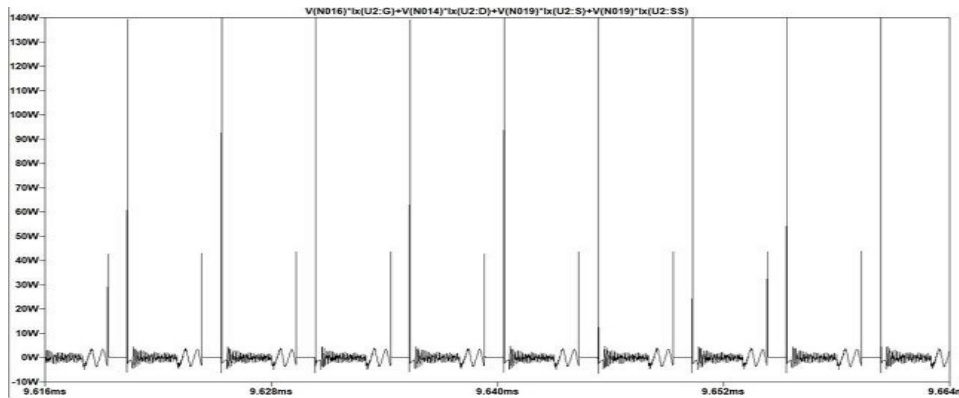


Рис. 4. Розсіювана потужність основного транзистора

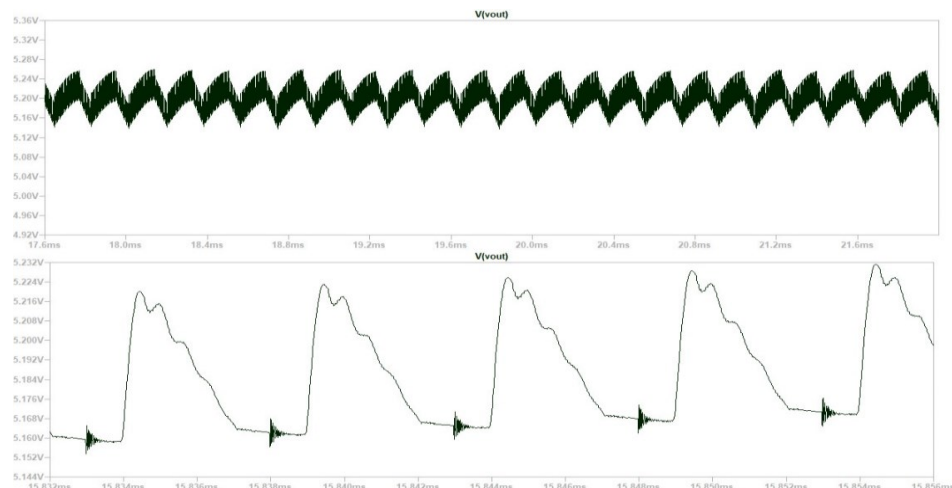


Рис. 5. Часова характеристика пульсацій вихідної напруги перетворювача

Вихідний каскад перетворювача вимагає наявності RC-смабера на діоді для демпфування високочастотного дзвону через паразитну індуктивність трансформатора та паразитну ємність діоду Шотткі. На рис. 5 показано пульсації напруги на виході перетворювача, яка становить приблизно 60-65 мВ.

На рис. 6 зображено роботу пристрою, коли струм навантаження різко змінюється від 10% до 90% від номінального навантаження. Вихідна напруга блоку живлення тримає напругу приблизно 5 В, яка являється номінальною, не залежно від різкої зміни навантаження.

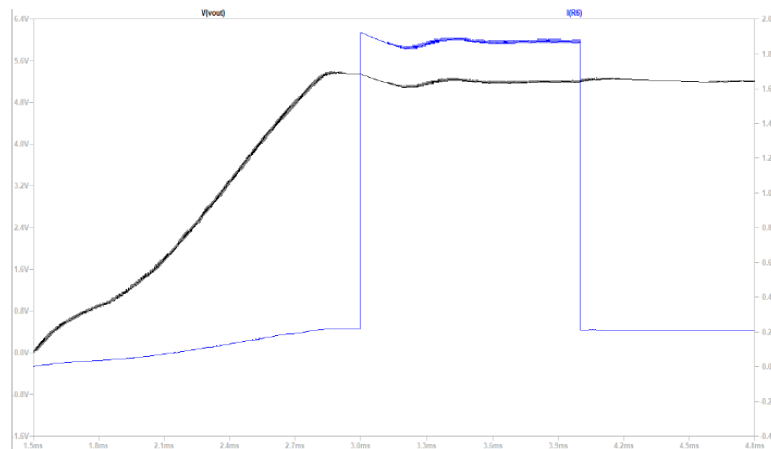


Рис. 6. Зміна вихідної напруги під час зміни струму навантаження з 10% до 90%

Основні втрати – це втрати на силових елементах приладу. Транзистор на основі GaN в основі перетворювача має відносно невеликі втрати потужності, порівнюючи з такими ж перетворювачами на традиційних польових транзисторах, що дозволяє зменшити розміри пасивного радіатора.

Висновки

Запропоновано спосіб створення ефективних імпульсних джерел живлення на прикладі зворотногоходового перетворювача змінного струму в постійній з використанням польового транзистора на основі нітриду галію як основного комутуючого приладу.

До переваг розробленого зворотногоходового перетворювача можна віднести зниження на декілька порядків динамічних втрат і пульсацій на основному транзисторі при низькому тепловиділенні. Враховуючи результати можна зробити висновок, що використання транзисторів з нітриду галію дозволяє працювати на більш високих частотах перемикання з високою ефективністю.

До недоліків пристрою можна віднести необхідність використання швидкодіючих драйверів затворів нітрид-галієвого транзистора для компенсації небажаних ефектів, таких як коливання та шуми затвора транзистора, які можуть призвести до некерованого включення транзистора.

Проте, запропонована модель спроектованого пристрою дозволяє створювати стабільніші та енергоефективні імпульсні джерела живлення. Таким чином, використання пристроїв з широкою забороненою зоною, таких як пристрої на основі нітриду галію, є ефективним та перспективним для створення високочастотних імпульсних силових пристроїв енергії придатних до використання у якості джерел живлення у системах, де малі габарити необхідні, такі як системи живлення малих літальних апаратів, телекомунікаційні мережі.

References

1. Wang G. Design of flyback power supply of DC equipment in PV power plant. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. T. 1983, № 1. C. 012068. URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1983/1/012068>.
2. Gokcegoz F., Akboy E., Obdan A. H. Analysis and Design of a Flyback Converter for Universal Input and Wide Load Ranges. *Electrica*. 2021. URL: <https://doi.org/10.5152/electrica.2021.20092>.
3. Rahayu S., Firmansyah E., Isnaeni M. Interleaved Flyback DC-DC Converter Design with 350 W Power Output Using LT 3757 in LT Spice. *Journal of Physics: Conference Series*. 2017. T. 824. C. 012003. URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/824/1/012003>.
4. Tahan M., Bamgboje D., Hu T. Flyback-Based Multiple Output dc-dc Converter with Independent Voltage Regulation. 2018 9th IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), Charlotte, NC, 25–28.06. 2018 p. 2018. URL: <https://doi.org/10.1109/pedg.2018.8447884>.
5. Kazimierczuk M. K. *Pulse-Width Modulated DC-DC Power Converters*. Chichester, West Sussex: John Wiley & Sons, Ltd., 2008. URL: <https://doi.org/10.1002/9780470694640>.
6. Basso C. P. *Switch-Mode Power Supplies: SPICE Simulations and Practical Designs*. McGraw-Hill Education, 2014. 992 p.
7. Lidow A. *GaN Transistors for Efficient Power Conversion*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2019. URL: <https://doi.org/10.1002/9781119594406>.