

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з навчальної роботи
Національного технічного
університету України

“Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського”

к.т.н., доц.

Тетяна ЖЕЛЯСКОВА



“ 27 ” лютого 20 25 р.

ВИТЯГ

з протоколу № 02/2025 від 14 лютого 2025 р. розширеного засідання
кафедри прикладної радіоелектроніки

Національного технічного університету України
“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”

БУЛИ ПРИСУТНІ:

- з кафедри прикладної радіоелектроніки: в.о. зав. кафедри, к.т.н., професор Мовчанюк А.В., д.т.н., професор, Нелін Є.А., д.т.н., с.н.с., Степанов М.М., д.т.н., професор, Зінковський Ю.Ф., к.т.н., доцент, Мосійчук В.С., к.т.н. Зінгер Я.Л., к.т.н., доцент, Лащевська Н.О., к.т.н., доцент, Перегудов С.М., д.т.н., професор, Яненко О.П., к.т.н., доцент, Приходько І.О., к.т.н., доцент Шульга А.В., к.т.н., доцент Антипенко Р.В, ст. викладач Адаменко В.О., ст. викладач Нікітчук А.В, ст. викладач Головня В.М, ст. викладач Новосад А.А., к.т.н., доцент Кирпатенко І.М., PhD, ст. викладач Єзерський Н.В, PhD, ст. викладач Сокольський С.О., ст. викладач Титенко О.Т., PhD, асистент Середін А.П., PhD, асистент Веремійчук Г.М., асистент Броварник С.А.
- з кафедри радіоінженерії Радіотехнічного факультету КПІ ім. Ігоря Сікорського: декан Радіотехнічного факультету, доцент кафедри радіоінженерії, к.т.н., доцент, Мартинюк С.Є.
- з кафедри електронних комунікацій та інтернету речей Навчально-наукового Інституту телекомунікаційних систем КПІ ім. Ігоря Сікорського: гарант освітньої програми, професор, д.т.н., професор, Уривський Л.О.

СЛУХАЛИ:

1. Повідомлення аспіранта кафедри прикладної радіоелектроніки Бурковського Ярослава Юрійовича за матеріалами дисертаційної роботи “Високоєфективні імпульсні нітрид-галієві енергоперетворювачі рухомих безпілотних радіосистем”, поданої на здобуття ступеня доктора філософії з

галузі знань 17 Електроніка та телекомунікації за спеціальністю 172 Телекомунікації та радіотехніка.

Освітньо-наукова програма Телекомунікації та радіотехніка.

Тему дисертаційної роботи “Високоєфективний імпульсний перетворювач з цифровим керуванням на основі напівпровідників з широкою забороненою зоною” затверджено на засіданні Вченої ради радіотехнічного факультету (протокол №11/2020 від “30” листопада 2020 року) та перезатверджено на тему “Високоєфективні імпульсні нітрид-галієві енергоперетворювачі рухомих безпілотних радіосистем” на засіданні Вченої ради радіотехнічного факультету (протокол № 01/2025 від “27” січня 2025 року).

Науковим керівником затверджений академік ПАН України, д.т.н, Зіньковський Ю. Ф.

2. Запитання до здобувача.

Запитання по темі дисертації ставили: д.т.н., професор, Уривський Л.О., д.т.н., професор, Яненко О.П., к.т.н., доцент, Перегудов С.М., к.т.н., доцент, Кирпатенко І.М.

3. Виступи за обговореною роботою.

В обговоренні дисертації взяли участь: д.т.н., професор, Уривський Л.О., д.т.н., професор, Зіньковський Ю.Ф., д.т.н., професор, Яненко О.П., к.т.н., доцент, Перегудов С.М., к.т.н., професор Мовчанюк А.В., к.т.н., доцент, Кирпатенко І.М.

УХВАЛИЛИ:

ПРИЙНЯТИ такий висновок про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертаційного дослідження:

1. Актуальність теми дослідження

Сучасний розвиток телекомунікацій, а також стрімке поширення безпілотних літальних апаратів та безпілотних наземних автономних платформ, що широко застосовуються у різних сферах, постійно підвищує вимоги до систем електроживлення. Високоєфективні та компактні енергоперетворювачі з можливістю роботи при різноманітних навантаженнях, частотних режимах та екстремальних температурах набувають визначального значення для підвищення ефективності і функціональності сучасних безпілотних систем. Традиційні кремнієві напівпровідникові елементи досягають своїх меж за робочою напругою, частотою, енергоефективністю та рівнем теплових втрат, що створює потребу в нових підходах до створення силових електроніки.

На цьому тлі напівпровідники з широкою забороненою зоною та їх впровадження відкриває можливості створення більш енергоефективних, і компактних імпульсних перетворювачів енергії. Врахування специфічних вимог до бортових систем живлення БПЛА/БПА, де критично важливими є

масогабаритні показники, гнучкість у налаштуванні параметрів та стійкість до зовнішніх впливів, визначає актуальність даного дослідження. Вдосконалення підходів до моделювання, оптимізації та практичного впровадження GaN-транзисторів у складі імпульсних джерел живлення надає можливість створювати новітні електронні системи, здатні ефективно функціонувати у складних умовах експлуатації.

2. Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Робота виконувалася згідно з планами НДР на кафедрі прикладної радіоелектроніки радіотехнічного факультету Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” згідно з затвердженим рішенням Вченої ради радіотехнічного факультету (протокол №11/2020 від “30” листопада 2020 року), напрямку досліджень “Конструювання радіоелектронної апаратури нового покоління” (згідно зі звітом відповідності наукової складової ОНП доктор філософії науковим школам, напрямам наукової діяльності кафедр та наукових керівників аспірантів радіотехнічного факультету) та закону про пріоритетні напрямки розвитку науки і техніки та інноваційної діяльності України в сфері “Енергетика та енергоефективність”.

3. Наукова новизна отриманих результатів

У дисертації вперше одержані такі нові наукові результати:

1. Розроблено аналітичну методику оцінки фізичних обмежень кремнієвих MOSFET та транзисторів на широкозонних напівпровідниках. Виявлено квадратичну залежність мінімального опору каналу від максимальної зворотної напруги та кубічну обернену залежність від критичної напруженості електричного поля у діапазоні 10 В – 10 кВ та діапазоні опорів 0,1 мОм – 10 Ом. На основі цих результатів створено еквівалентну модель GaN транзистора, що враховує паразитні параметри (ємності, струми витоку, опір каналу), їх температурні залежності та граничні режими роботи в системах енергоперетворення.
2. Створено та впроваджено теоретичну методику оцінки втрат параметричної оптимізації параметрів понижуючого енергоперетворювача системи живлення БПЛА/БПА на нітрид-галієвій основі. Дана методика дозволила отримати розподіл статичних і динамічних втрат 1:3 та провести оптимізацію параметрів, що дозволило досягнути розрахункового значення ККД у 97,8% при повному навантаженні. Отримано та доведено аналітичну залежність ККД від вихідного навантаження що апроксимується експоненційною функцією насичення та описує вплив динамічних втрат на ефективність роботи перетворювача.
3. Створено та змодельовано цифрову систему керування, що включає в себе цифровий регулятор та компенсатор ланки зворотного зв'язку на основі цифрового фільтру. Отримана система забезпечує працездатність перетворювача на частотах >1 МГц, адаптацію

режимів роботи та переналаштування без фізичної зміни компонентів. Експериментально підтверджені отримані теоретичні результати. Виявлено, що максимальне значення ККД досягається при 100% навантаженні, що пояснюється значним внеском динамічних втрат порівняно зі статичними втратами. Досягнуто експериментальний ККД перетворювача 97,6%. Покращено ККД на 5%, зменшено масу в 1,9 рази, об'єм у 2 рази, рівень пульсацій напруги в 2,3 рази, допустимий вихідний струм зріс у 1,5 рази порівняно із раніше використаним серійно доступним рішенням. Підвищення ККД та зменшення масогабаритних характеристик забезпечило зростання дальності польоту тестового зразка БПЛА на 17%.

4. Теоретичне та практичне значення результатів роботи, впровадження

Отримані результати надають можливість ефективної розробки новітніх імпульсних енергоперетворювачів, що поєднують високий ККД, визначні масогабаритні показники та адаптивність до змін умов роботи. Застосування розроблених методів моделювання, оптимізації та цифрового керування дозволяє скоротити обсяг випробувань, підвищити точність теоретичних розрахунків та моделей, спростити оптимізацію параметрів, мінімізувати втрати та забезпечити стабільну роботу перетворювачів на основі GaN-транзисторів. Це дозволяє створювати високоефективні бортові системи живлення безпілотних платформ, в яких висуваються суворі вимоги до маси, розмірів та енергоефективності. Розроблені у ході дослідження прототипи перетворювачів, були впроваджені у практично застосовуваних БПЛА та БПА у сфері оборонної та гуманітарної діяльності. Створений енергоперетворювач можна рекомендувати для застосування в галузях, які потребують високої енергоефективності в умовах обмеження допустимих габаритів та маси.

5. Апробація результатів дисертації

Основні положення дисертаційної роботи обговорювались на вітчизняних і міжнародних науково-технічних конференціях: XXV Міжнародний молодіжний форум «Радіoeлектроніка та молодь у XXI столітті» (Харків, Україна, 2021), Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи (Київ, Україна, 2020), Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи (Київ, Україна, 2019), Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи (Київ, Україна, 2016) Science and Technology of the XXI Century (Київ, Україна, 2017)

6. Дотримання принципів академічної доброчесності

За результатами науково-технічної експертизи дисертація Бурковського Я. Ю. визнана оригінальною роботою, яка не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату та запозичень.

7. Перелік публікацій за темою дисертації із зазначенням особистого внеску здобувача

За результатами досліджень опубліковано 12 наукових публікацій, у тому числі:

- 0 одноосібних монографій, 0 одноосібних розділів у колективних монографіях;

- 5 статей у наукових фахових виданнях України за спеціальністю 172 Телекомунікації та радіотехніка, в т.ч. 0 статей у яких число співавторів (разом із здобувачем) більше двох осіб;

- 0 статей у періодичних наукових виданнях проіндексованих у базах Scopus та/або Web of Science Core Collection із зазначенням квартилю видання (якщо такий є);

- 0 патентів України на винахід, що пройшли кваліфікаційну експертизу;

- 1 патент України на корисну модель;

- 6 тез виступів на наукових конференціях;

Статті у наукових фахових виданнях України:

1. Бурковський Я., Зінковський Ю. Моделювання мережевого коректора коефіцієнта потужності (PFC) з використанням напівпровідників з широкою забороненою зоною. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*. 2023. Т. 327, № 5(2). С. 30–35. URL: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2023-327-5-30-35>.

Особистий внесок здобувача: дослідження, комп'ютерне моделювання та створення експериментального прототипу коректора коефіцієнта потужності (PFC), де в якості силових модулів були використані елементи на основі напівпровідників з широкою забороненою зоною — карбїду кремнію (SiC) та нітриду галію (GaN).

2. Burkovskiy Y., Zinkovskiy Y. Power loss characterization in compact GaN transistor-based synchronous buck converters for aerial drone applications. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences*. 2023. Vol. 329, no. 6. P. 28–32. URL: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2023-329-6-28-32>.

Особистий внесок здобувача: здобувачем проведено дослідження, моделювання та представлено комплексний аналіз втрат потужності в транзисторних синхронних понижуючих перетворювачах на основі нітриду галію (GaN), спеціально розроблених для використання в безпілотних літальних апаратах (БПЛА) та безпілотних наземних апаратах (БПА).

3. Burkovskiy Y. Y., Zinkovsky Y. F. Gallium nitride semiconductors: transforming the telecommunication systems power supply performance. *Scientific notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences*. 2024. Vol. 35 (74), no. 1, part 2. P. 211–215. URL: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.1.2/33>.

Особистий внесок здобувача: здобувачем проведено аналіз досягнень у сфері застосування широкозонних напівпровідників таких як нітрид галію (GaN) та його вплив на перетворювачі електричної енергії у системах живлення телекомунікаційного обладнання, безпілотних літальних апаратах (БПЛА) та

безпілотних наземних апаратах (БПА), проведено дослідження переваг подібних напівпровідників порівняно з традиційними рішеннями на основі кремнію.

4. Burkovskiy Y. Y., Zinkovsky Y. F. Simplified shunt bandwidth characterization generator for wide bandgap power converters. *Scientific notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences*. 2024. Vol. 35 (74), no. 4. P. 359–365. URL: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.4/56>.

Особистий внесок здобувача: здобувачем проведено аналіз методик характеризування шунтів для застосування у енергоперетворювачах на основі широкозонних напівпровідників, а саме нітриду галію (GaN) та карбіду кремнію (SiC). Здобувачем запропонована, спроектована та продемонстрована нова конструкція генератора імпульсів з коротким часом наростання для вимірювання характеристик шунтів перетворювачів на основі напівпровідників з широкою забороненою зоною.

5. Burkovskiy Y. Y., Zinkovsky Y. F. Digital potentiometer-controlled programmable instrumentation amplifier. *Scientific notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences*. 2023. Vol. 34 (73), no. 6. P. 12–18. URL: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.6/03>.

Особистий внесок здобувача: здобувачем проведено аналіз методів створення програмованих диференційних підсилювачів для застосування разом із струмовимірювальними шунтами у енергоперетворювачах на основі широкозонних напівпровідників. У ході дослідження здобувачем була запропонована та змодельована нова конструкція програмованого підсилювача, призначеного для застосування у струмовимірювальних колах імпульсних енергоперетворювачів з цифровою системою керування на основі широкозонних напівпровідників.

Патент на корисну модель:

6. Програмований диференційний підсилювач: пат. 144848 Україна: H03F3/45, H03G3/00. № u202003477; заявл. 09.06.2020; опубл. 26.10.2020, Бюл. № 20/2020. 4 с. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1460754/>.

Матеріали конференцій:

7. Burkovskiy Y. Gallium nitride electronics. "Science and Technology of the XXI Century": The XVIII All-Ukrainian Students R&D Conference Proceeding, Kyiv, 7 December 2017. Kyiv, 2017. P. 6–7.

Особистий внесок здобувача: аналіз літературних джерел, проведення теоретичних та експериментальних досліджень, оформлення результатів.

8. Бурковський Я. Ю., Арсенюк Д. О. Застосування галій-нітридних транзисторів (GaN FET) у системах живлення сучасної РЕА. «Радіотехнічні

поля, сигнали, апарати та системи» : матеріали конференції : Міжнар. науково-техн. конф., м. Київ, 18–24 листоп. 2019 р. Київ, 2019. С. 79–81.

Особистий внесок здобувача: аналіз літературних джерел, проведення теоретичних та експериментальних досліджень, оформлення результатів.

9. Арсенюк Д. О., Бурковський Я. Ю. Зворотноходовий перетворювач (flyback) з галійнітридовим (GaN) транзистором. *«Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи» : матеріали конференції : Міжнар. науково-техн. конф., м. Київ, 18–24 листоп. 2019 р. Київ, 2019. С. 76–78.*

Особистий внесок здобувача: аналіз літературних джерел, проведення теоретичних та експериментальних досліджень, оформлення результатів.

10. Бурковський Я. Ю. Двофазний мережевий коректор коефіцієнта потужності (PFC) з використанням карбід-кремнієвих (SiC) силових транзисторів. *Том 1. Конференція «Електронна, лазерна та біотехнічна інженерія» : XXV Міжнар. молодіж. форум «Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті, м. Харків, 20–22 квіт. 2021 р. Харків, 2021. С. 9–10.*

Особистий внесок здобувача: аналіз літературних джерел, проведення теоретичних та експериментальних досліджень, оформлення результатів.

11. Бурковський Я. Ю., Зінковський Ю. Ф. Моделювання мережевого коректора коефіцієнта потужності (PFC) з використанням карбід кремнієвих (SiC) силових транзисторів. *«Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи» : матеріали конференції : Міжнар. науково-техн. конф., м. Київ, 16–22 листоп. 2020 р. Київ, 2020. С. 151–153.*

Особистий внесок здобувача: аналіз літературних джерел, проведення теоретичних та експериментальних досліджень, оформлення результатів.

12. Бурковський Я. Ю., Зінченко М. В. Моделювання пасивного імітатора закладних пристроїв з флуктуючими параметрами. *«Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи» : матеріали конференції : Міжнар. науково-техн. конф., м. Київ, 14–20 берез. 2016 р. Київ, 2016. С. 216–218.*

Особистий внесок здобувача: аналіз літературних джерел, проведення теоретичних та експериментальних досліджень, оформлення результатів.

Якість та кількість публікацій відповідають «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44.

ВВАЖАТИ, що дисертаційна робота Бурковського Я. Ю. “Високоефективні імпульсні нітрид-галієві енергоперетворювачі рухомих безпілотних радіосистем”, що подана на здобуття ступеня доктора філософії з галузі знань 17 Електроніка та телекомунікації за спеціальністю 172 Телекомунікації та радіотехніка за своїм науковим рівнем, новизною

отриманих результатів, теоретичною та практичною цінністю, змістом та оформленням повністю відповідає вимогам, що пред'являють до дисертацій на здобуття ступеня доктора філософії та відповідає напрямку наукового дослідження освітньо-наукової програми КПІ ім. Ігоря Сікорського Телекомунікації та радіотехніка зі спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка.

РЕКОМЕНДУВАТИ:

1. Дисертаційну роботу «Високоєфективні імпульсні нітрид-галієві енергоперетворювачі рухомих безпілотних радіосистем», подану Бурковським Ярославом Юрійовичем на здобуття наукового ступеня доктора філософії, до захисту у разовій спеціалізованій вченій раді.

2. Вченій раді КПІ ім. Ігоря Сікорського утворити разову спеціалізовану вчену раду у складі:

Голова:

доктор технічних наук, професор, професор кафедри електронних пристроїв та систем факультету електроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», МОН України, **Жуйков Валерій Якович;**

Члени:

Рецензенти:

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електронних пристроїв та систем факультету електроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», МОН України, **Клен Катерина Сергіївна;**

доктор технічних наук, професор, професор кафедри автоматизації енергосистем факультету електроенерготехніки та автоматики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», МОН України, **Яндульський Олександр Станіславович;**

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор, професор кафедри прикладної математики та кібербезпеки факультету інформаційних і прикладних технологій Донецького національного університету імені Василя Стуса, МОН України, **Крижановський Володимир Григорович;**

доктор технічних наук, професор, професор кафедри електроніки, робототехніки і технологій моніторингу та інтернету речей факультету аеронавігації, електроніки та телекомунікацій державного університету "Київський авіаційний інститут", МОН України, **Яновський Фелікс Йосипович**.

Головуючий на
засіданні
к.т.н., професор, в.о.
завідувача
кафедри прикладної
радіоелектроніки



Андрій МОВЧАНЮК

Вчений секретар
кафедри прикладної
радіоелектроніки
к.т.н., доцент



Ірина ПРИХОДЬКО