

## **РЕЦЕНЗІЯ**

на дисертаційну роботу

Бурковського Ярослава Юрійовича

на тему «Високоефективні імпульсні нітрид-галієві енергоперетворювачі  
рухомих безпілотних радіосистем»,

представлену на здобуття ступеня доктора філософії

в галузі знань 17 «Електроніка та телекомунікації»

за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

### **Актуальність теми дисертації.**

Актуальність теми дисертації Бурковського Я.Ю. обумовлена необхідністю удосконалення та комплексної оптимізації сучасних методів аналізу, моделювання, проектування й впровадження енергоперетворювачів на основі напівпровідників з широкою забороненою зоною (WBG), таких як нітрид галію (GaN) та карбід кремнію (SiC). Значну увагу приділено їх застосуванню у бортових системах живлення радіоелектронного обладнання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) та наземних безпілотних автономних платформ (БПА). Це відповідає актуальній потребі в ефективних, компактних та масштабованих рішеннях із підвищеною енергоефективністю, термічною стабільністю, адаптивністю до складних умов експлуатації, де GaN і SiC демонструють переваги порівняно з традиційними кремнієвими приладами.

**Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.**

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному:

1. Розроблено аналітичну методику оцінки фізичних обмежень кремнієвих MOSFET та WBG-транзисторів, виявлено квадратичну залежність мінімального опору каналу від максимальної зворотної напруги та кубічну обернену залежність від критичної напруженості електричного поля у розглянутому діапазоні опорів та напруг.

2. На основі отриманих результатів створено еквівалентну модель GaN транзистора, що враховує паразитні параметри (ємності, струм витоку, опір каналу), їх температурні залежності та граничні режими роботи в системах енергоперетворення. Крім того, запропоновано методику оцінки втрат та параметричної оптимізації понижуючого енергоперетворювача на GaN для БПЛА/БПА, що дозволило досягнути розподілу статичних і динамічних втрат у співвідношенні 1:3 та розрахункового ККД 97,8% при повному навантаженні. Отримано та доведено аналітичну залежність ККД від навантаження, яка апроксимується експоненційною функцією насичення та описує вплив динамічних втрат на ефективність роботи перетворювача.

3. Розроблено та змодельовано цифрову систему керування на основі цифрового регулятора та компенсатора ланки зворотного зв'язку на основі цифрового фільтру, яка забезпечує працездатність перетворювача на частотах понад 1 МГц та адаптивність до зміни режимів роботи без фізичних втручань у перетворювач. Експериментально підтверджено, що максимальний ККД (97,6%) досягається при повному навантаженні, а сукупність запропонованих рішень дозволила покращити ККД на 5%, зменшити масу у 1,9 рази, об'єм у 2 рази, рівень пульсацій напруги у 2,3 рази та підвищити допустимий струм у 1,5 рази порівняно з серійним аналогічним енергоперетворювачем. Підвищення ККД та покращення масогабаритних характеристик забезпечило зростання дальності польоту тестового зразка БПЛА на 17%.

Достовірність наукових результатів, положень та висновків, отриманих у дисертації, підтверджена системним підходом до проведення досліджень, а саме співпадінню отриманих теоретичних результатів, результатів комп'ютерно-



математичного моделювання та результатів проведених експериментальних досліджень, стендових вимірювань та результатів практичних впроваджень. Результати досліджень були опубліковані у рецензованих фахових виданнях, які передбачають попередню перевірку матеріалів на елементи плагіату та наукову новизну. Отримані результати мають цілком конкретне практичне застосування в інженерних рішеннях, які показали свої переваги порівняно з існуючими відомими аналогами.

Наукові дослідження були виконані здобувачем на кафедрі прикладної радіоелектроніки КПІ ім. Ігоря Сікорського в рамках НДР (рішення Вченої ради радіотехнічного факультету (протокол № 11/2020 від «30» листопада 2020 року) та напрямку досліджень «Конструювання радіоелектронної апаратури нового покоління») під керівництвом професора кафедри прикладної радіоелектроніки, д.т.н, професора, академіка ПАН України Зінковського Юрія Францевича.

Отже, в дисертаційній роботі поставлене наукове завдання з розробки та обґрунтування методів теоретичного аналізу, математичного та комп'ютерного моделювання, а також практичної оптимізації та підвищення ККД високочастотних імпульсних перетворювачів енергії у бортових радіосистемах рухомих безпілотних платформ, виконано повністю, здобувач повною мірою оволодів методологією наукової діяльності.

**Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності.**

За своїм змістом дисертаційна робота здобувача Бурковського Я.Ю. повністю відповідає Стандарту вищої освіти зі спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка» та напрямкам досліджень відповідно до освітньої програми «Телекомунікації та радіотехніка». Дисертаційна робота є завершеною науковою працею і свідчить про наявність особистого внеску здобувача у науковий напрям «Телекомунікації та радіотехніка».

Розглянувши звіт подібності за результатами перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадіння, можна зробити висновок, що дисертаційна робота Бурковського Ярослава Юрійовича є результатом самостійних досліджень здобувача і не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату та запозичень. Використані ідеї, результати і тексти інших авторів мають належні посилання на відповідне джерело.

### **Мова та стиль викладення результатів.**

Дисертаційна робота написана українською мовою. Робота написана логічно, послідовно та детально, науковим стилем із використанням загальноприйнятих наукових термінів, величин та понять, що робить її зрозумілою при прочитанні.

Дисертація складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку літератури та додатків. Загальний обсяг дисертації 162 сторінки.

У вступі Здобувачем обґрунтовано актуальність теми, визначено мету, завдання, об'єкт і предмет дослідження, наведено методи та основні наукові результати, особистий внесок автора та апробацію матеріалів дисертації, у тому числі і у практичних застосуваннях.

У першому розділі проведено аналіз літературних джерел, що підтверджує доцільність застосування широкозонних напівпровідників, таких як нітрид галію (GaN) і карбід кремнію (SiC), у системах енергоперетворення завдяки компактності, високій частоті перемикання та низьким втратам енергії. Запропоновано методику оцінки фізичних обмежень транзисторів, що виявила квадратичну залежність мінімального опору каналу від максимальної зворотної напруги та кубічну обернену залежність від критичної напруженості електричного поля. Доведено важливість комплексного підходу, що включає аналіз динаміки комутації, вимог до драйверів затвора, топології друкованих плат.



У другому розділі розглянуто переваги GaN-транзисторів у перетворювачах, серед яких висока стійкість до пробою, стабільна порогова напруга, низький опір каналу та доведено, що низькі значення паразитних ємностей призводять до зниження втрат на перемиканні та підвищення граничної робочої частоти. Розроблено методику оцінки розподілу втрат та оптимізації енергоефективності понижувального GaN-перетворювача, що дозволила досягнути ККД 97,8% при повному навантаженні. Створено комп'ютерну еквівалентну модель GaN-транзистора з урахуванням статичних, динамічних та температурних параметрів, граничних режимів роботи та їх температурної залежності.

У третьому розділі досліджено вплив GaN-транзисторів на стабільність роботи імпульсних перетворювачів у режимах безперервної (CCM), переривчастої (DCM) та примусової провідності (FCM). Створено математично-комп'ютерну модель системи керування, що враховує передатні функції основних компонентів: модуляторів, фільтрів та компенсаторів на основі цифрового регулятора та адаптивного компенсатора на базі цифрового IIR фільтру. Моделювання у MATLAB/SIMULINK та SPICE підтвердило ефективність інтегрованого підходу та дозволило оптимізувати конструкцію з урахуванням паразитних втрат.

У четвертому розділі міститься практичне впровадження результатів дослідження у конструкцію імпульсного енергоперетворювача з модульною архітектурою, адаптивного до різних платформ БПЛА/БПА. Створений експериментальний прототип забезпечив ККД 97,6%, що відповідає розрахункам, а порівняно з серійними аналогами досягнуто підвищення ККД щонайменше на 5%, зниження маси у 1,9 рази, об'єму вдвічі, зменшення пульсацій напруги у 2,3 рази, підвищення допустимого струму в 1,5 рази. Впроваджені рішення дозволили збільшити радіус дії тестового зразка БПЛА на 17% завдяки зменшенню масогабаритних показників та покращенню ККД енергоперетворювача. Результати експериментальних випробувань підтвердили правильність отриманих теоретичних результатів.

Дисертаційна робота оформлена відповідно до вимог наказу МОН України від 12 січня 2017 р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації».

### **Оприлюднення результатів дисертаційної роботи.**

Наукові результати дисертації висвітлені у 6 наукових публікаціях здобувача, серед яких: 5 статей у наукових виданнях, включених на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України; 1 патент України на корисну модель. Також результати дисертації були апробовані на 6 наукових фахових конференціях.

Публікація автором результатів досліджень у рецензованих фахових виданнях, які передбачають попередню перевірку матеріалів на відсутність плагіату, є одним із елементів підтвердження відсутності порушень академічної доброчесності. В наукових публікаціях плагіату та порушень академічної доброчесності не виявлено.

Таким чином, наукові результати описані в дисертаційній роботі повністю висвітлені у наукових публікаціях здобувача.

### **Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.**

1. Матеріал викладено, в цілому, згідно з правилами наукового стилю надання інформації, але є певна кількість орфографічних, стилістичних помилок, іншомовних позначень які не впливають в цілому на розуміння роботи.
2. На ст. 115 автор пропонує впроваджувати запропоновані рішення у багатофазних перетворювачах. Було б доцільно розглянути напрямок впровадження широкозонних напівпровідників у багатофазні та/або багаторівневі перетворювачі більш детально.



3. На ст. 132, при описі практичних досліджень з інтеграцій у системи зі значним рівнем ризиків бажано описати вжиті заходи безпеки при проведенні іспитів.
4. На ст. 132-133 автором описується практичне впровадження розробленого перетворювача у високовідповідальні системи зі значним рівнем ризиків, але при цьому у роботі не наведено теоретичної та практичної оцінки надійності даного перетворювача.
5. Відповідно, при описі схеми перетворювача на ст. 126 (рис. 4.7) було б доцільно вказати які системи моніторингу підвищення відмовостійкості були впроваджені в енергоперетворювачі, і як вони кількісно впливають на рівень його надійності та розрахунковий період безвідмовної роботи (MTBF).
6. При описі на ст. 133-136 практичного застосування наукових висновків роботи було б доцільно провести економічний розрахунок та оцінити економічну ефективність від впровадження виробів у серійне виробництво у порівнянні із доступними серійними аналогами.

Вважаю, що висловлені зауваження не є визначальними і не зменшують загальну наукову новизну та практичну значимість результатів та не впливають на позитивну оцінку дисертаційної роботи.

### **Висновок про дисертаційну роботу.**

Вважаю, що дисертаційна робота здобувача ступеня доктора філософії Бурковського Ярослава Юрійовича на тему «Високоефективні імпульсні нітрид-галієві енергоперетворювачі рухомих безпілотних радіосистем» виконана на високому науковому рівні, не порушує принципів академічної доброчесності та є закінченим науковим дослідженням, сукупність теоретичних та практичних результатів якого розв'язує наукове завдання, що має істотне значення для галузі «Електроніка та телекомунікації». Дисертаційна робота за актуальністю,

практичною цінністю та науковою новизною повністю відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачені в п.6 – 9 «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. Здобувач Бурковський Ярослав Юрійович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань «Електроніка та телекомунікації» за спеціальністю 172 – «Телекомунікації та радіотехніка».

**Рецензент:**

професор кафедри  
автоматизації енергосистем  
Національного технічного  
університету України  
«Київський політехнічний  
інститут імені Ігоря  
Сікорського», доктор  
технічних наук, професор



Олександр ЯНДУЛЬСЬКИЙ



«2<sup>м</sup>» травня 2025 року.