

## **ВІДГУК**

офіційного опонента 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.**

Дисертаційне дослідження Бурковського Я. Ю. виконано на дуже актуальну тему в контексті сучасних викликів та умов в нашій державі. Розвиток та поширення безпілотних літальних апаратів (БПЛА) та безпілотних наземних автономних платформ (БПА), які наразі широко застосовуються у оборонній та цивільній сферах, постійно підвищує вимоги до систем електроживлення та телекомунікації, а високоефективні та малогабаритні енергоперетворювачі з можливістю стабільної роботи в екстремальних умовах набувають все більшого значення. Традиційні підходи до конструювання таких систем на основі кремнієвих напівпровідників майже досягли межі за робочою напругою, частотою, енергоефективністю та рівнем теплових втрат, що створює потребу у новому науковому підході до створення силової електроніки, яка є невід'ємною частиною для конструювання БПЛА/ БПА з урахуванням викликів часу.

Здобувачем виконано роботу, присвячену розробці, удосконаленню та комплексній оптимізації методів аналізу, моделювання, проектування та впровадження енергоперетворювачів, створених на основі напівпровідникових структур із широкою забороненою зоною (WBG), зокрема нітриду галію (GaN) та карбіду кремнію (SiC). На основі цього дослідження ним розроблені та впровадженні системи живлення для радіоелектронного обладнання БПЛА та БПА. Здобувачем запропонований комплексний методологічний підхід в роботі, що включає теоретичну наукову та експериментальну частину, де здобувач

представляє розроблені моделі та системи на основі своїх наукових висновків, що успішно були впроваджені на практиці та вже знайшли своє застосування. Тому, я вважаю, що дисертація Бурковського Ярослава Юрійовича, яка присвячена науковій розробці, удосконаленню, оптимізації сучасних наукових методів аналізу, моделювання, проектування, порівняння та практичного застосування енергоперетворювачів, створених на основі напівпровідникових структур із широкою забороненою зоною, зокрема нітриду галію та карбїду кремнію, є актуальною.

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

Наукова новизна дисертаційного дослідження здобувача полягає у наступному:

1. У розробці комплексної теоретичної методики оцінки втрат та параметричної оптимізації понижуючого енергоперетворювача для систем живлення БПЛА/БПА на основі GaN транзисторів. Запропонований підхід поєднує математичне моделювання, SPICE-симуляції та комп'ютерно-математичні моделі у MATLAB/SIMULINK, що дозволило врахувати паразитні явища та оцінити їх вплив на енергетичні втрати. У результаті було отримано співвідношення статичних і динамічних втрат 1:3 та досягнуто розрахункового значення ККД 97,8% при повному навантаженні. Аналітично доведено залежність ККД від навантаження, яка апроксимується експоненційною функцією насичення та враховує динамічні втрати.
2. Здобувачем була розроблена цифрова система керування, що включає регулятор та компенсатор зворотного зв'язку на основі цифрового фільтра. Ця система забезпечує стабільну роботу перетворювача на частотах понад 1 МГц, дозволяє змінювати режими роботи та виконувати переналаштування без потреби у фізичній заміні компонентів. Теоретичні результати були підтверджені експериментально: досягнуто ККД на рівні 97,6%, покращено ефективність на 5%, зменшено масу пристрою у 1,9 рази, об'єм — у 2 рази, рівень пульсацій напруги — у 2,3 рази, а вихідний струм збільшено у 1,5 рази порівняно



з серійно доступним рішенням. Сукупний ефект таких покращень дозволив збільшити дальність польоту тестового зразка БПЛА на 17%.

3. Крім того, у межах роботи запропоновано аналітичну методику оцінки фізичних обмежень для кремнієвих MOSFET та широкозонних напівпровідникових транзисторів. Було виявлено квадратичну залежність мінімального опору каналу від максимальної зворотної напруги, а також обернену кубічну залежність від критичної напруженості електричного поля. На основі цих результатів створено еквівалентну модель GaN-транзистора, яка враховує паразитні параметри, температурні залежності та граничні режими роботи в системах енергоперетворення.

Достовірність отриманих результатів підтверджена сукупністю теоретичних розрахунків, моделюванням, програмним аналізом та експериментальною перевіркою. Запропоновані технічні рішення вже впроваджені у практичне застосування, що свідчить про прикладну цінність і наукову значущість проведеної роботи. Обґрунтування основних результатів та висновків дисертаційної роботи Здобувача виконано з необхідною повнотою на основі аналізу як отриманих експериментальних результатів в процесі полігонних іспитів, так і теоретичних та наукових досліджень та розрахунків, наведених в роботі, які вдало поєднані в представленій праці.

Отримані наукові результати здобувача Бурковського Я. Ю. мають конкретні практичні технічні впровадження, які показали свої переваги перед існуючими аналогами та уже успішно застосовуються на практиці.

Отже, в дисертаційній роботі поставлене наукове завдання 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 співпадиння, 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. Принципових зауважень до подання матеріалу у дисертації не маю, викладення матеріалу загалом чітке та стилістично виважене, робота написана згідно вимог до наукової праці. Дисертація складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку літератури та додатків. Загальний обсяг дисертації становить 162 сторінки.

У вступі Здобувач обґрунтовує вибір теми дослідження та пояснює її актуальність, наводить сучасний стан проблем по темі дослідження дисертації та необхідність їх вирішення, формулює мету та завдання роботи, наводить методи дослідження та представляє інформацію про об'єкти та предмети дослідження в даній роботі, формулює основні наукові та практичні результати роботи, а також доводить їх наукову новизну і практичну цінність. Висвітлено особистий внесок Здобувача, відомості про апробацію результатів роботи та публікації за темою дисертації.

У першому розділі автор аналізує джерела, що підкреслюють актуальність дослідження широкозонних напівпровідників. Матеріали на основі нітриду галію та карбіду кремнію демонструють значні переваги порівняно з кремнієвими технологіями, які вже наблизилися до своїх теоретичних меж. Здобувач розробив аналітичну методику оцінки фізичних обмежень кремнієвих



MOSFET та транзисторів на широкозонних матеріалах, виявивши квадратичну залежність мінімального опору каналу від максимальної зворотної напруги та кубічну обернену залежність від критичної напруженості електричного поля.

Показано, що силові пристрої на базі GaN і SiC потребують комплексного наукового підходу, який поєднує теоретичні розрахунки, комп'ютерне моделювання та практичні випробування. Такий підхід дозволяє враховувати особливості динаміки вмикання/вимикання, вимоги до драйверів затвора, оптимізацію швидкості наростання напруги й струму, вибір робочих і пікових струмів стоку, а також специфіку топології друкованих плат. Саме ці завдання стали основним науковим фокусом дисертаційної роботи.

У другому розділі описано та доведено переваги GaN транзисторів у системах перетворення енергії, включаючи високу толерантність до пробойів, стабільну порогову напругу, низькі втрати на провідність та можливість компактного конструктивного виконання. Здобувачем розроблено MATLAB модель для GaN транзисторів, яка враховує нелінійні ємності та температурні ефекти, що дозволяє виконувати детальне моделювання електричних властивостей GaN транзисторів та проводити комп'ютерну оптимізацію імпульсних джерел живлення на їх основі, проаналізовано поведінку паразитних ємностей у GaN транзисторах, включаючи ємності затвор-витік, затвор-сток та сток-виток, науково доведено можливість їх роботи на високих частотах при мінімальних втратах. Розроблені порівняльні методи оцінки втрат понижуючого перетворювача бортового джерела живлення БПЛА, що підтвердили переваги ефективності GaN пристроїв.

У третьому розділі Здобувачем розроблена цифрова модель системи керування на основі зворотного зв'язку за напругою та з компенсатором на основі БІХ-фільтра, досліджено аналогові та цифрові системи керування перетворювачем на основі GaN транзисторів, що дозволяє перетворювачу працювати у режимі безперервної (CCM), переривчастої (DCM) та примусової провідності (FCM), розроблена модель системи керування, що враховує передатні функції основних компонентів. Наукові висновки та правильність розробленої моделі підтверджено проведенням математичним моделюванням у

середовищі MATLAB/SIMULINK. Здобувачем запропонована оптимізація фільтрів для режимів ССМ і DСМ, що враховує вплив паразитних втрат і параметрів перетворювача, а також розроблена теоретична програмна модель, що є практичним інструментом для аналізу високоефективних цифрових перетворювачів на основі напівпровідників із широкою забороненою зоною.

У четвертому розділі Здобувачем запропоновані та втілені у практику отримані ним наукові розробки, розрахунки та результати досліджень для вирішення конкретних інженерних застосувань та показані їх переваги перед існуючими рішеннями. А саме досліджено практичне застосування GaN напівпровідників у синхронному імпульсному понижувальному перетворювачі та впровадженні цифрові методи керування. В ході досліджень та полігонних випробувань була практично підтверджена ефективність запропонованого перетворювача у високонавантажених системах та підтверджена запропонована Здобувачем математична модель та наведені теоретичні розрахунки. 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%. Таким чином, 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%.

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.

Вимоги до кількості публікацій, необхідних здобувачеві для присудження ступеня доктора філософії виконано.

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 цілому, у наукових публікаціях 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.**

Наукову роботу Бурковського Я. Ю. оцінюю позитивно, але маю ряд наступних зауважень до поданої дисертаційної роботи:

1. Викладення матеріалу загалом чітке та стилістично виважене, однак наявна певна кількість орфографічних, стилістичних та синтаксичних помилок, але вони не впливають на розуміння матеріалу.
2. На сторінці 41 автор наводить отриману залежність теоретичного ліміту питомого опору від максимальної напруги пробою (рис. 1.2) для різних типів напівпровідників. Було б доцільно на цьому графіку додатково проаналізувати та розглянути сучасні експериментальні напівпровідникові матеріали, наприклад, експериментальні напівпровідники на основі оксиду галію ( $\text{Ga}_2\text{O}_3$ ).
3. На сторінці 81 автор проводить розрахунок теоретичної енергоефективності енергоперетворювача на нітрид-галієвій основі та приводить гістограму розподілу втрат (рис. 2.18). Було б доцільно додатково проаналізувати економічний ефект при впровадженні даного енергоперетворювача у цивільних застосуваннях з урахуванням вищого ККД та нижчих енергетичних втрат.

4. У четвертому розділі під час описання здобувачем практичного впровадження розробок було б доцільно оцінити та звернути увагу на собівартість застосування запропонованої методики у серійне виробництво та довести економічну та практичну вигоду, оцінивши співвідношення ціна-якість.
5. В подальшому пропоную автору розглянути інтеграцію розробленої системи енергоперетворення (та її майбутніх модифікацій) у внутрішню інформаційно-комунікаційну мережу БПЛА з метою впровадження адаптивного керування бортовими енергосистемами та можливості передачі її внутрішніх показників на наземну станцію керування.

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 17 «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 17 – «Електроніка та телекомунікації» за спеціальністю 172 – «Телекомунікації та радіотехніка»

**Офіційний опонент:**

професор кафедри електроніки,  
робототехніки і технологій  
моніторингу та інтернету речей  
факультету аеронавігації,  
електроніки та телекомунікацій  
державного університету  
«Київський авіаційний інститут»,  
доктор технічних наук, професор



Фелікс ЯНОВСЬКИЙ.

*Гіриш Яновський Ф. засвідчує*  
*Вчений секретар КАН*

М.П.

«\_\_\_\_»

20\_\_\_\_ року



*Генерал Небож*