

## **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.**

В дисертації розглядаються деякі важливі аспекти побудови пристроїв силової електроніки з використанням польових транзисторів на основі широкозонних напівпровідників – нітриду галію (GaN) та карбіду кремнію (SiC). Використання таких транзисторів призвело до суттєвого поліпшення радіоапаратури у високочастотному та мікрохвильовому діапазонах частот, одночасно почалось вивчення можливостей застосування таких пристроїв у силовій електроніці. З'явилися оптимізовані пари пристроїв у складі потужного транзистора та спеціалізованої мікросхеми драйвера і проектувальники почали використовувати їх як стандартне рішення. Разом з тим, розуміння процесів у потужному транзисторі залишається однією з найважливіших умов створення радіоапаратури з високими показниками або нестандартних конструкцій. Тому створення верифікованих моделей потужних транзисторів на основі широкозонних напівпровідників залишається актуальною задачею. Велике практичне значення має створення та удосконалення методів проектування, програмних засобів, що є метою даної дисертаційної роботи. Також використання транзисторів на основі SiC та GaN дозволяє створювати системи з кращими тактико-технічними показниками, що у багатьох застосуваннях є безперечною перевагою, і розробка таких пристроїв є актуальною задачею. Тому тема дисертації Бурковського Я. Ю., яка присвячена розробці, удосконаленню та оптимізації методів аналізу, моделювання, проектування та практичному застосуванню енергоперетворювачів, створених на основі широкозонних матеріалів, зокрема SiC та GaN є актуальною.

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

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному:

1. Удосконалено теорію транзисторів на основі GaN у частині виявлення нових залежностей у зв'язку параметрів матеріалів та транзисторів, зокрема виявлено квадратичну залежність мінімального опору каналу від максимальної зворотної напруги, а також обернену кубічну залежність від критичної напруженості електричного поля. Розвинуто метод оцінки втрат та оптимізації показника ККД перетворювача на основі напівпровідників з широкою забороненою зоною. Створена комп'ютерно-математична модель GaN транзистору для застосувань у системах енергоперетворення.
2. Проведена оцінка співвідношення статичних і динамічних втрат 1:3 для розглянутих параметрів задачі роботи перетворювача напруги, та досягнуто розрахункового значення ККД 97,8% при повному навантаженні. Аналітично виявлено залежність ККД від навантаження, яка апроксимується експоненціальною функцією насичення та враховує динамічні втрати.
3. До вирішення практичних задач можна віднести створення цифрового регулятора та компенсатора кола зворотного зв'язку для імплементації у доступні мікроконтролерні системи, що дозволило автору спростити проектування кіл компенсації імпульсних перетворювачів, підвищити адаптивність та спростити перехід на іншу елементну базу. Проведене комп'ютерне моделювання даного регулятора довело працездатність запропонованого рішення.
4. На основі проведених наукових досліджень та удосконалення методів розрахунку були запропоновано прототипи височастотних енергоперетворювачів з використанням GaN транзисторів для впровадження у БПЛА та БПА. У процесі експериментальної валідації було доведено працездатність перетворювача, а також експериментально підтверджені отримані теоретичні результати. Завдяки впровадженню рішень, у ході тестування було продемонстровано підвищення ККД перетворювача на 5%, зниження показників маси у 1,9 рази, зниження пульсацій вихідної напруги у 2,3 рази та підвищення допустимого вихідного струму у 1,5 рази порівняно із раніше використаним серійно доступним рішенням. Завдяки цьому, було досягнуто зростання радіусу дії тестового зразка БПЛА на 17%.

Обґрунтованість і достовірність отриманих результатів підтверджується коректним використанням сучасних методів теорії та моделювання фізико-електронних характеристик радіотехнічних пристроїв силової електроніки. Адекватність розроблених конструкцій та їх працездатність підтверджуються



експериментальними дослідженнями з використанням відповідного радіовимірювального обладнання, дотриманням методики отримання достовірних результатів, та відповідністю експериментальним результатам інших науковців. Отримані наукові результати були практично впроваджені в інженерних рішеннях, які продемонстрували переваги перед існуючими аналогами.

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 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. Принципових зауважень до подання матеріалу у дисертації немає, робота написана послідовно, доступно із дотриманням мовно-стилістичних вимог до наукової праці. Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку літератури та додатків. Загальний обсяг дисертації 162 сторінки.

У вступі обґрунтований вибір теми дослідження та її актуальність, проаналізовано сучасний стан проблем по темі дослідження дисертації, сформульовано мету та завдання роботи, наведені методи дослідження представлено інформацію про об'єкт та предмет дослідження. Сформульовано основні наукові та практичні результати роботи, а також показана їх наукова новизна і практична цінність. Висвітлено особистий внесок здобувача, відомості про апробацію результатів роботи та публікації за темою дисертації.

У першому розділі проведено аналіз джерел, який вказує на необхідність вивчення та зростаючу важливість напівпровідників з широкою забороненою зоною у галузі силових електроніки. Аналітично доведено, що силові

напівпровідники на основі кремнію наближаються до своїх теоретичних меж, а такі матеріали, як нітрид галію і карбід кремнію, пропонують значні переваги порівняно з традиційними технологіями на основі кремнію, зокрема з точки зору енергоефективності, тепловиділення та ККД у імпульсних джерелах живлення. Було продемонстровано, що силові пристрої на основі нітриду галію та карбіду кремнію вимагають комплексного наукового підходу, який включає в себе теоретичні розрахунки, експериментальні імплементації та значний елемент комп'ютерного моделювання, щоб повністю розкрити їх потенціал та врахувати експлуатаційні параметри. Власне саме на це були спрямовані основні наукові завдання дисертаційної роботи.

У другому розділі розроблено MATLAB модель для силових 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. Розроблені методи оцінки втрат понижуючого перетворювача бортового джерела живлення БПЛА, що підтвердили переваги ефективності GaN пристроїв.

У третьому розділі досліджено аналогові та цифрові системи керування перетворювачем на основі GaN транзисторів, здобувачем розроблена математично-комп'ютерна модель системи керування, що враховує передатні функції основних компонентів: модуляторів, фільтрів та компенсаторів та забезпечує симуляцію роботи системи в режимах CCM і DCM. Розроблена цифрова система керування та компенсатор ланцюга зворотного зв'язку на основі цифрового фільтра з метою імплементації у доступних мікроконтролерних системах. Працездатність розробленої моделі підтверджено проведеним математичним моделюванням у програмі MATLAB/SIMULINK. Дана модель розширює доступні інструменти для впровадження новітніх імпульсних систем електроживлення з цифровою системою керування у практичне застосування.

У четвертому розділі на основі проведених наукових досліджень здобувачем запропоновані та втіленні у практичні застосування результати отриманих ним наукових дослідження та інженерних розробок. А саме, досліджено практичне застосування GaN транзисторів у конструкції синхронного імпульсного понижувального перетворювача та впровадженні цифрові методи керування для підвищення ефективності його роботи та зменшення теплових втрат. Проведені SPICE-симуляції підтвердили, що коефіцієнт корисної дії розробленої системи при максимальному навантаженні становить близько 97,6%, що було передбачено при використанні



запропонованого удосконаленого методу розрахунку ККД. Крім того, експериментально підтверджено стабільну роботу перетворювача у широкому діапазоні навантажень і відповідність вихідних характеристик до технічних вимог, що підтверджує правильність теоретичних рішень та моделювання. Завдяки впровадженним рішенням, у ході тестування було продемонстровано підвищення ККД перетворювача на 5%, зниження показників маси у 1,9 рази, зниження пульсацій вихідної напруги у 2,3 рази та підвищення допустимого вихідного струму у 1,5 рази порівняно із раніше використаним серійно доступним рішенням. Завдяки цьому, було досягнуто зростання радіусу дії тестового зразка БПЛА на 17%. В ході досліджень та випробувань було практично підтверджено запропоновану здобувачем наукову модель та наведені теоретичні розрахунки.

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. Таким чином, вимоги до кількості публікацій, необхідних здобувачеві для присудження ступеня доктора філософії виконано.

Публікація автором результатів досліджень у рецензованих виданнях, які передбачають попередню перевірку матеріалів на відсутність запозичень, є одним із елементів підтвердження відсутності порушень академічної доброчесності. В цілому, у наукових публікаціях та у дисертації 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.**

Позитивно оцінюючи наукову роботу Бурковського Я. Ю., вважаю за необхідне зазначити наступні зауваження до поданої дисертаційної роботи:

1. Викладення матеріалу загалом послідовне та виважене, однак наявна певна кількість орфографічних, стилістичних та синтаксичних помилок, але вони не впливають на розуміння матеріалу. Присутнє використання іншомовних слів на деяких рисунках та схемах, які цілком можливо замінити на українськомовні аналоги.

2. Дисертаційна робота містить скорочення та аббревіатури по тексту, однак не завжди дається розшифровка скорочення при першому згадуванні або у переліку скорочень.
3. На ст. 32 автор вводить показник FOM (figure of merit або добротність транзистора в ключовому режимі роботи). Було б доцільно надати пояснення фізичного змісту даного параметру та проаналізувати його вплив на роботу енергоперетворювача. Крім того, на ст. 33 (рис. 1.1) автор наводить гістограму FOM тільки для двох транзисторів – сучасного кремнієвого MOSFET транзистора та його історичного аналогу. Було б доцільно додати декілька проміжних точок аналізу для оцінки зміни показнику добротності із процесом розвитку технології виготовлення напівпровідників.
4. При проведенні розрахунків та пояснень використаних формул та на графіках результатів моделювання перетворювача у розділі 4 автор іноді надає написи розмірності отриманих результатів згідно міжнародних стандартів, хоча є українські аналоги для цих розмірностей.
5. При проведенні SPICE моделювання варто було б включити більшу кількість паразитних параметрів для більшого наближення модельованої системи до реального перетворювача.
6. У четвертому розділі при описанні здобувачем практичної розробки було б доцільно надати більш детальний опис вимірювального стенду та комплексу вимірювань на відповідність екстремальним ситуаціям при роботі перетворювача.
7. Деякі загальні формулювання, пов'язані з описом тематики роботи, можуть бути пропущені, щоб більш чітко зосередитися на ключових моментах роботи, пов'язаних з теоретичним та практичним внеском здобувача.

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  
прикладної математики та  
кібербезпеки факультету  
інформаційних і  
прикладних технологій  
Донецького національного  
університету імені Василя  
Стуса доктор технічних  
наук, професор

 / Володимир КРИЖАНОВСЬКИЙ



М.П.

« 26 » травня 2022