

## **РЕЦЕНЗІЯ**

на дисертаційну роботу

**Довгаля Артема Володимировича**

на тему «**Удосконалення високовольтних широкосмугових каскадних вимірювальних підсилювачів для пристроїв відтворення одиниці напруги змінного струму радіочастотного діапазону**»,  
представлену на здобуття ступеня доктора філософії  
в галузі знань 15 Автоматизація та приладобудування  
за спеціальністю 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка

### **Актуальність теми дисертації**

Підвищення вимог до точності, стабільності та швидкодії вимірювальних систем, зокрема у сфері метрологічного забезпечення еталонів змінної напруги, зумовлює необхідність створення сучасних високовольтних широкосмугових підсилювачів. Рецензована робота вирішує одне з ключових завдань сучасної метрології – забезпечення точного й стабільного відтворення одиниці змінної напруги в радіочастотному діапазоні. Вирішення цієї науково-технічної задачі дозволяє підвищити метрологічні характеристики національних еталонів, сприятиме розвитку засобів калібрування, стандартизації і сертифікації, а також матиме практичне значення для суміжних галузей, включаючи телекомунікації, радіотехніку та вимірювальну електроніку

Враховуючі зазначене вище, тему дисертаційної роботи «Удосконалення високовольтних широкосмугових каскадних вимірювальних підсилювачів для пристроїв відтворення одиниці напруги змінного струму радіочастотного діапазону» можна вважати актуальною.

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

Основні наукові результати, отримані у дисертаційній роботі, є обґрунтованими та підтвердженими теоретичними та експериментальними результатами.

Наведені в дисертаційній роботі результати математичного моделювання та схемотехнічного аналізу свідчать про логічність та послідовність проведених

досліджень. Моделювання роботи розроблених технічних засобів за допомогою систем автоматизованого проектування радіоелектронного спрямування та лабораторні експериментальні дослідження виконані з урахуванням впливу конструктивних особливостей, паразитних параметрів, частотних похибок та температурних факторів. Розроблені методики частотної корекції, зменшення похибок, а також каскадного розширення динамічного діапазону дозволили отримати метрологічні характеристики, що перевищують існуючі технічні вимоги до еталонного обладнання (зокрема, еталона ВВЕТУ 08-07-01-09).

Достовірність отриманих результатів підтверджується узгодженістю результатів аналітичних досліджень та комп'ютерного моделювання, відтворюваністю результатів експериментальних досліджень, низькими рівнями статистичних флуктуацій сигналу, апробацією та практичним впровадженням розроблених підсилювачів у метрологічному комплексі.

Наукова новизна представленої до рецензування роботи полягає в наступному:

1. Створено математичну модель багатокаскадного високовольтного широкосмугового підсилювача на базі операційних підсилювачів з індивідуальними, незалежними негативними зворотними зв'язками та напругою живлення, що слідує за вихідною напругою.
2. Виявлена закономірність розташування і значень коефіцієнтів підсилення окремих каскадів високовольтного широкосмугового вимірювального підсилювача для мінімізації загальної кількості каскадів.
3. Вперше знайдено схемотехнічне рішення застосування резисторів зворотного зв'язку одного типу та номіналу багатокаскадного підсилювача.
4. Вперше отримано аналітичний вираз сумарного коефіцієнта підсилення через комплексні коефіцієнти підсилення послідовних каскадів операційних підсилювачів, що дало змогу визначення частотної похибки багатокаскадного підсилювача.

З огляду на вищесказане, можна зробити висновок, що наукові результати дисертації є достовірними, новими та такими, що мають практичну цінність для галузі метрології та високоточної вимірювальної техніки.

Наукові дослідження виконані здобувачем на кафедрі інформаційно-вимірювальних технологій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» відповідно до Постанови Кабінету Міністрів України № 942 від 07.09.2011 р. «Про затвердження переліку пріоритетних тематичних напрямків наукових досліджень і науково-технічних розробок на період до 2023 року» під керівництвом доктора технічних наук, професора кафедри інформаційно-вимірювальних технологій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Туза Юліана Михайловича.

Таким чином, поставлене в дисертаційній роботі наукове завдання дослідження проблем проектування високовольтних широкосмугових вимірювальних підсилювачів та знаходження нових рішень, пов'язаних із забезпеченням максимально можливої вихідної напруги і стабільності відтворення сигналу в широкій смузі частот, а також застосування конструктивних рішень, пов'язаних із забезпеченням коректного та безпечного теплового режиму функціонування – виконано повністю, здобувач повною мірою оволодів методологією наукової діяльності.

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

За своїм змістом дисертаційна робота Довгала Артема Володимировича повністю відповідає Стандарту вищої освіти зі спеціальності 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка» та відповідає науковим напрямкам досліджень відповідно до освітньої програми Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка.

Дисертація є завершеною науковою працею і свідчить про наявність особистого внеску здобувача у науковий напрям метрології та інформаційно-вимірювальної техніки.

Здобувачем створено дослідний зразок запропонованого багатокаскадного високовольтного широкосмугового підсилювача на базі операційних підсилювачів з індивідуальними незалежними зворотними зв'язками з напругою живлення, що слідує за вихідною напругою, в діапазоні напруги від 0.1 В до 30 В у частотному діапазоні від до 30 МГц та в діапазоні напруги від 100 В до 1000 В у частотному діапазоні від до 100 кГц, що дозволило розширити динамічний та частотний діапазони формування напруги та підвищити часову стабільність відтворення одиниці напруги змінного струму.

Результати дисертаційної роботи впроваджено у вторинному військовому еталоні електричної напруги в діапазоні напруг від 0,001 В до 1000 В змінного струму в діапазоні частот від 10 Гц до 30 МГц (ВВЕТУ 08-07-01-09).

Аналіз звіту подібності за результатами перевірки дисертаційної роботи свідчить про те, що подана дисертація Довгаля Артема Володимировича є самостійним науковим дослідженням здобувача. У роботі не виявлено ознак фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату чи неналежних запозичень. Усі використані ідеї, наукові результати та текстові фрагменти інших авторів належним чином оформлені з відповідними бібліографічними посиланнями на джерела.

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

Дисертаційна робота написана українською мовою. Мова дисертації науково-термінологічно вивірена, стиль лаконічний, чіткий, технічно грамотний. Опис теоретичних моделей, аналітичних розрахунків і практичних рішень зрозумілий, аргументований і не перевантажений зайвими деталями. Ступінь формалізації та глибина технічного аналізу відповідають вимогам до дисертації на здобуття ступеня доктора філософії у галузі метрології та вимірювальної техніки.

Дисертація складається з вступу, 4 розділів, висновків, списку літератури та додатків. Обсяг основної частини дисертації налічує 147 сторінок.

У вступі обґрунтовано актуальність обраної теми, визначено мету, основні завдання, предмет, об'єкт та методи дослідження. Також здобувач визначив наукову новизну і прикладне значення отриманих результатів, особистий внесок

у проведені дослідження, надав інформацію про практичну апробацію результатів дисертації.

У першому розділі «Підсилювачі високої напруги в еталонах змінного струму радіочастотного діапазону» Довгаль А. В. провів огляд методів точного вимірювання напруги змінного струму; виокремив основні джерела похибок при генеруванні змінної напруги в еталонах, що зумовлюють необхідність використання термоелектричного перетворювача; розглянув частотні похибки, спричинені впливом індуктивних та ємнісних ефектів конструкції. Автор наголосив, що такі похибки можуть бути визначені та компенсовані за допомогою відповідних схемотехнічних рішень. Найефективнішим рішенням для розширення робочого та динамічного діапазону напруг та зменшення похибок відтворення сигналу в термоелектричних перетворювачах автор слушно вважає каскадну побудову підсилювачів як метод, що найкраще відповідає вимогам сучасних еталонів напруги.

У другому розділі «Розробка технічних рішень для побудови високовольтних широкосмугових підсилювачів» автор запропонував методи розширення динамічного діапазону підсилювачів, підвищення ефективності та зменшення втрат потужності, забезпечення ефективного охолодження на основі композитів з нітриду алюмінію, спільне застосування яких дає змогу досягти оптимального співвідношення між вихідною потужністю, енергоефективністю та температурною стабільністю, що є головним чинником у проектуванні високовольтних підсилювачів; мінімізації впливу паразитних зв'язків конструкції, що знижує ємнісні зв'язки і позитивно впливає на роботу високочастотних каскадів.

У третьому розділі «Моделювання та аналіз високовольтних широкосмугових каскадних підсилювачів» проведено детальний аналіз двох моделей високовольтних широкосмугових підсилювачів: 100кГц-1000В та 30МГц-30В. За допомогою розрахунків матричних рівнянь для вузлових струмів та контурних напруг здобувач обґрунтував можливість досягнення заданих характеристик за напругою та частотою, а також можливість оцінювання й мінімізації похибок, спричинених конструктивними особливостями схеми.

У четвертому розділі «Визначення метрологічних характеристик підсилювачів» запропоновано та реалізовано поетапну частотну корекцію кожного каскаду окремо, з використанням додаткових коригувальних RC-ланок, що дозволило істотно знизити відхилення і досягти рівномірності амплітудно-частотної характеристики у заданому діапазоні частот.

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 8 наукових публікаціях здобувача, серед яких: 2 статті у наукових виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України; 4 статті у періодичних наукових виданнях, проіндексованих у базах даних Scopus (Q4) та Web of Science.

Результати дисертації апробовані на 2 наукових фахових конференціях: Міжнародній науково-технічній конференції «Датчики, прилади та системи – 2024» (Черкаси, 30.05.2024) та VIII<sup>TH</sup> International Samsonov Conference “Materials Science of Refractory Compounds” (MSRC, 25.05.2022).

Захищено патентом (№ 152343 від 11.01.2023 р.) оригінальну схемотехнічну реалізацію багатокаскадного підсилювача та технічне рішення розширення динамічного діапазону підсилювача.

Результати вимірювань, здійснені за допомогою модернізованих блоків підсилювачів, були розглянуті на засіданні науково-технічної ради МЦВЕ ЗС України (протокол №3 від 28.02.2025).

Усі публікації здобувача мають високий науковий рівень. У жодній з публікацій не порушено принципи академічної доброчесності. Особистий внесок здобувача до усіх наукових публікацій, опублікованих зі співавторами та зарахованих за темою дисертації, є досить вагомим. Таким чином, наведені в дисертаційній роботі наукові результати повною мірою висвітлені у наукових публікаціях здобувача.

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

У процесі ознайомлення з дисертацією Довгаля А.В. виявлено деякі незначні недоліки та дискусійні питання.



1. На мою думку, недостатньо розкрито поведінку підсилювачів у режимі великого сигналу. Зазначається, що робота в цьому режимі обмежує частотний діапазон, проте дисертація тільки б виграла, якщо би був проведений поглиблений аналіз чи наведена порівняльної характеристики поведінки підсилювачів у різних режимах роботи.

2. Уніфікація компонентної бази може створювати труднощі при масштабуванні та серійному виробництві. Зокрема, використання каскадної структури підсилювачів із залученням нестандартних або спеціалізованих джерел живлення, які не входять до типового промислового асортименту, суттєво ускладнює повторюваність результатів у різних умовах реалізації та практичне впровадження в умовах масового виробництва. Таке інженерне рішення є обґрунтованим у рамках лабораторного експерименту або дослідної розробки, однак з точки зору промислової уніфікації, стандартизації та техніко-економічної доцільності воно може вимагати додаткової адаптації. Залучення нестандартизованих елементів або складних конфігурацій живлення вимагає спеціального технічного забезпечення, що, у свою чергу, підвищує вартість реалізації системи та її обслуговування. Тому доцільно було б у подальших наукових дослідженнях розглянути варіанти спрощення архітектури з урахуванням доступності типових компонентів, уніфікованих джерел живлення та промислових стандартів для полегшення інтеграції розробки у виробничі процеси.

3. Дискусійним аспектом у дисертаційній роботі є забезпечення температурної стабільності функціонування підсилювача та вплив теплових навантажень на його електричні характеристики, особливо за умов тривалої експлуатації у змінному температурному середовищі, що особливо актуально у зв'язку з використанням у конструкції ізольованих джерел живлення з ємнісним зв'язком, для яких характерні підвищені втрати та локальне тепловиділення. Температурні флуктуації можуть суттєво впливати на параметри активних і пасивних елементів підсилювальних каскадів, зокрема на коефіцієнт підсилення, рівень шумів, вхідний/вихідний імпеданс, а також стабільність живлення. У дисертації це питання згадується лише побіжно, без детального аналізу

механізмів термічного впливу та без проведення моделювання або експериментальної оцінки температурної поведінки системи.

4. Додаткового опрацювання, на мою думку, вимагає питання інтеграції розроблених підсилювачів у складі існуючих метрологічних комплексів, особливо з урахуванням вимог до апаратної сумісності, електромагнітної відповідності, інтерфейсних рішень та стандартів промислової метрології.

У дисертаційній роботі основна увага зосереджена на схемотехнічному вдосконаленні та покращенні частотних і лінійних характеристик підсилювачів. Водночас питання інженерної інтеграції розроблених рішень у реальні системи вимірювання та калібрування залишено поза увагою. Недостатня увага до питань уніфікації, стандартизації та модульної сумісності може створити певні бар'єри для практичного впровадження результатів дисертації в сертифіковане вимірювальне обладнання. Майбутні наукові розробки доцільно було б розширити дослідженнями у напрямі системної інтеграції підсилювачів з урахуванням вимог міжнародних стандартів та конструктивної уніфікації.

5. Дискусійним є питання щодо вибору оптимальної кількості каскадів у структурі підсилювача, що безпосередньо впливає на досягнення балансу між схемною складністю, електричною стабільністю та цільовими вихідними характеристиками (коефіцієнтом підсилення, смугою пропускання, лінійністю тощо). У дисертаційній роботі здобувач обґрунтовує переваги каскадного підходу як ефективного засобу для розширення робочого діапазону та підвищення точності вимірювань. Проте кількість каскадів, їх структура та розподіл посилення між ними визначають не лише загальні характеристики підсилювача, але й його надійність, енергоспоживання, теплову стабільність, рівень міжкаскадних перешкод та загальний коефіцієнт спотворень.

У дисертації це питання розглянуто з позицій функціонального досягнення цільових параметрів, проте відсутній аналіз оптимальності обраної кількості каскадів з урахуванням компромісів між стабільністю, компактністю та техніко-економічною ефективністю.



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 Довгала Артема Володимировича на тему «Удосконалення високовольтних широкосмугових каскадних вимірювальних підсилювачів для пристроїв відтворення одиниці напруги змінного струму радіочастотного діапазону» 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 Метрології та інформаційно-вимірювальної техніки.

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.

Вважаю, що здобувач Довгаль Артем Володимирович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 15 Автоматизація та приладобудування за спеціальністю 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка.

Рецензент:

професор кафедри інформаційно-вимірювальних технологій  
Національного технічного університету  
України «Київський політехнічний  
інститут імені Ігоря Сікорського» МОН  
України, доктор технічних наук, доцент

Костянтин ШЕВЧЕНКО



2025 року