

ВИСНОВОК

про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації Ільїна Станіслава Сергійовича на тему «Вплив генерованого електричного поля накачки та електричного поля підпору на підсилювальні властивості супергетеродинного параметричного лазеру на вільних електронах», поданої на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 105 «Прикладна фізика та наноматеріали»

Характеристика особистості здобувача

Ільїн Станіслав Сергійович у 2019 році закінчив Сумський державний університет за спеціальністю «Електронні прилади та пристрої», освітній рівень «Бакалавр»; з 2019 до 2020 рр. навчався у Сумському державному університеті за спеціальністю «Прикладна математика», освітній рівень «Магістр». З 2021 р. до 2025 р. включно був здобувачем наукового ступеню доктора філософії в Сумському державному університеті за спеціальністю 105 «Прикладна фізика та наноматеріали» на кафедрі електроніки, загальної та прикладної фізики.

Тему дисертації у останній редакції затверджено на засіданні Вченої ради СумДУ (протокол № 16 від «29» травня 2025 р.).

За час навчання в аспірантурі Ільїн С. С., зарекомендував себе сумлінним, відповідальним та високопрофесійним науковим працівником. Він опанував сучасні наукові методики та оволодів інноваційними підходами до здійснення наукових досліджень.

Ільїн С. С. прийняв участь у таких всеукраїнських та міжнародних науково-практичних конференціях: Міжнародній науково-технічній конференції «Інформатика, математика, автоматика (ІМА-2020)» (Суми, Україна, 2020); Міжнародній науково-технічній конференції «Інформатика, математика, автоматика (ІМА-2021)» (Суми, Україна, 2021); Міжнародній науково-технічній конференції «Інформатика, математика, автоматика (ІМА-2022)» (Суми, Україна - Астана, Казахстан, 2022); 18-й Міжнародній науковій конференції «XVIII International Scientific Conference Electronics And Applied Physics (APHYS-2022)» (Київ, Україна, 2022 р.); Міжнародній науковій конференції «2022 IEEE 2nd Ukrainian Microwave Week (UkrMW-2022)» (Харків, Україна, 2022 р.); 19-й Міжнародній науковій конференції «XIX International Scientific Conference Electronics And Applied Physics (APHYS-2023)» (Київ, Україна, 2023 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Інформатика, математика, автоматика (ІМА-2023)» (Суми, Україна - Астана, Казахстан, 2023 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Інформатика, математика, автоматика (ІМА-2024)» (Суми, Україна - Астана, Казахстан, 2024 р.); 20-й Міжнародній науковій конференції «XX International Scientific Conference Electronics And Applied Physics (APHYS-2024)» (Київ, Україна, 2024 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Інформатика,

математика, автоматика (ІМА-2025)» (Суми, Україна – Астана, Казахстан, 2025 р.).

Об'єктом дослідження дисертації є процес підсилення електромагнітних хвиль у супергетеродинних параметричних лазерах на вільних електронах.

Актуальність теми

Терагерцове (ТГц) випромінювання, що займає унікальне положення в електромагнітному спектрі між мікрохвильовим та інфрачервоним діапазонами ($\sim 0,1\text{--}10$ ТГц), привертає дедалі більшу увагу світової наукової спільноти. Це зумовлено його особливими фізичними властивостями: проникна здатність крізь діелектричні речовини (папір, пластик, одяг, кераміку), які є непрозорими у видимому світлі, високою чутливістю до вмісту води та характерними спектральними реакціями багатьох складних молекул (білків, ДНК, вибухових речовин, фармацевтичних препаратів) саме в цьому діапазоні частот. Ці властивості відкривають широкі перспективи для революційних застосувань.

На сьогоднішній день ТГц технології активно розвиваються і знаходять потенційне застосування в багатьох критично важливих галузях: безпека (неінвазійний огляд людей та багажу в аеропортах та інших громадських місцях для виявлення прихованої зброї, вибухівки та заборонених речовин), медицина та біологія (висококонтрастна візуалізація тканин (особливо для діагностики онкологічних захворювань на ранніх стадіях), безконтактна діагностика стану шкіри, дослідження процесів гідратації біомолекул), промисловість та контроль якості (неруйнівний контроль упакованих товарів, виявлення дефектів у композитних матеріалах, пластиках, кераміці, контроль товщини та однорідності покриттів), наукові дослідження (спектроскопія для ідентифікації речовин, вивчення низькоенергетичних збуджень у твердих тілах (фононів, плазмонів), дослідження надшвидких процесів у напівпровідниках та біологічних системах), зв'язок (розробка систем бездротового зв'язку надвисокої пропускної здатності (потенційно для стандартів 6G і вище)), астрономія та моніторинг довкілля (спостереження за холодними об'єктами у Всесвіті, дистанційне виявлення забруднюючих речовин в атмосфері).

Однак, повна реалізація цього величезного потенціалу значною мірою стримується через так звану «терагерцову щілину» – історичну нестачу достатньо потужних, ефективних, компактних та джерел, які здатні перелаштовувати свою частоту, і чутливих детекторів у цьому частотному діапазоні. Саме тому розробка та вдосконалення джерел ТГц випромінювання є одним із ключових завдань сучасної прикладної фізики та інженерії.

Лазери на вільних електронах (ЛВЕ) позиціонують себе як одні з найпотужніших та універсальних інструментів для генерації когерентного ТГц випромінювання, що вирізняються можливістю плавного налаштування частоти в широкому діапазоні та високою піковою і середньою потужностями.

Тим не менш, існуючі ЛВЕ часто мають значні габарити та є складними в експлуатації, що обмежує їх практичне використання. Отже, дослідження, спрямовані на підвищення ефективності генерації, зменшення розмірів установок та розробку нових, оптимізованих схем ЛВЕ, залишаються надзвичайно актуальними.

Перспективним напрямком у розвитку ЛВЕ є використання супергетеродинних параметричних схем, які передбачають застосування додаткових механізмів підсилення сигналу поряд із традиційними. Зокрема, супергетеродинні параметричні ЛВЕ використовують поздовжній електростатичний ондулятор для додаткового підсилення хвиль просторового заряду (ХПЗ) в електронному пучку через механізм параметричного резонансу. Використання додаткового механізму підсилення потенційно дозволяє значно збільшити загальний коефіцієнт підсилення системи, особливо на високих частотах електромагнітних хвиль та при відносно низьких енергіях пучка, а також генерувати потужні мультигармонічні сигнали.

Разом з цим, слід зазначити, що фізичні процеси в супергетеродинних параметричних ЛВЕ до робіт автора були вивчені недостатньо і потребували детального теоретичного дослідження. Були не вивченими ефект генерації електричного поля накачки, яке суттєво впливає на динаміку електромагнітних хвиль у ЛВЕ. Не був з'ясований вплив електричного поля підпору на підсилювальні характеристики таких ЛВЕ.

Таким чином, теоретичне дослідження та оптимізація процесів взаємодії хвиль у супергетеродинному параметричному ЛВЕ, включаючи аналіз впливу генерованого електричного поля накачки та електричного поля підпору, є актуальною та важливою науковою задачею. Її вирішення дозволить поглибити розуміння фізики роботи таких пристроїв, визначити оптимальні режими їх функціонування, розробити методи підвищення ефективності підсилення та зменшити поздовжні розміри, що є важливим кроком на шляху створення більш компактних, потужних та універсальних джерел ТГц випромінювання для наукових та прикладних задач.

Зв'язок роботи з науковими програмами та темами

Робота виконана на кафедрі прикладної математики та моделювання складних систем Сумського державного університету. Матеріали дисертаційної роботи пов'язані з виконанням держбюджетної теми: «Мультигармонічні процеси в лазерах на вільних електронах клістронного типу» (№ 0120U102140, 2020–2023 рр.). Дисертант брав участь як виконавець у проведенні наукових досліджень у вищезазначеній НДР.

Особистий внесок дисертанта полягає у безпосередній участі у постановці завдань, створенні математичних та комп'ютерних моделей, проведенні розрахунків, обробці та інтерпретації отриманих результатів, обговоренні отриманих результатів, підготовці наукових публікацій. Постановку задач досліджень і узагальнення результатів зроблено разом із

науковим керівником доктором фіз.-мат. наук, проф. О. В. Лисенко. Автором особисто підготовлено текст тез доповідей [7-17], а також окремі розділи статей [1-6]. Основні наукові результати доповідались особисто автором на наукових семінарах і конференціях. Усі наукові положення і висновки, що винесені на захист, належать авторові дисертації.

Ступінь обґрунтованості та достовірності наукових положень, висновків та рекомендацій, що сформульовані в дисертації

Дисертаційне дослідження Ільїна Станіслава Сергійовича виконано на високому методичному рівні з використанням комплексу сучасних методів дослідження. Основні наукові положення та висновки, сформульовані в дисертації, логічно випливають із одержаних результатів та є достатньо обґрунтованими. Вони відповідають поставленій меті та завданням дослідження. Чітко структуровано основні напрямки дослідження, зокрема питання додаткового механізму підсилення електромагнітної хвилі сигналу за допомогою генерованого електричного поля накачки та електричного поля підпору. Результати досліджень доповідались та обговорювались на міжнародних науково-технічних конференціях, а також опубліковані в наукових міжнародних та фахових виданнях. Про достовірність отриманих результатів свідчить їх взаємоузгодженість та відповідність літературним даним.

Наукова новизна результатів

1. Уперше з'ясовано, що в супергетеродинних параметричних ЛВЕ реалізується ефект генерації електричного поля накачки. Встановлено, що амплітуда генерованого електричного поля накачки має значення в середньому 30% від амплітуди зовнішнього електричного поля накачки. Цей ефект призводить до збільшення інкремента зростання ХПЗ на 30% та дозволяє зменшити повздовжні габарити супергетеродинних параметричних ЛВЕ.

2. Уперше знайдено найбільш просту та ефективну форму електричного поля підпору, яка дозволяє суттєво підвищити рівні насичення в супергетеродинному параметричному ЛВЕ. Залежно від конкретної схеми супергетеродинного параметричного ЛВЕ таке електричне поле підпору дозволяє збільшити рівень насичення на 70% – 130%.

3. Уперше отримано у кубічно-нелінійному наближенні самоузгоджену систему диференціальних рівнянь для амплітуд гармонік хвиль супергетеродинних параметричних лазерів на вільних електронах Н-убітронного типу. Враховано ефект генерації електричного поля накачки та електричне поле підпору. Продемонстровано, що такі ЛВЕ здатні генерувати потужні електромагнітні хвилі в терагерцовому діапазоні, мають менші повздовжні розміри порівняно з традиційними терагерцовими лазерами.

4. Уперше з'ясовано, що генероване електричне поле накачки та електричне поле підпору накачки не руйнує режим підсилення мультигармонічних хвиль просторового заряду в секції підсилення

супергетеродинних параметричних ЛВЕ. Це дає змогу створювати ЛВЕ, що здатні генерувати потужні електромагнітні хвилі зі складним мультигармонічним спектром.

Практичне значення отриманих результатів

У кубічно-нелінійному наближенні створено самоузгоджену систему диференціальних рівнянь, які описують динаміку амплітуд гармонік хвиль супергетеродинних параметричних лазерів на вільних електронах. Цей підхід дозволяє визначити оптимальні параметри супергетеродинних параметричних ЛВЕ, які здатні формувати потужні електромагнітні хвилі в терагерцовому діапазоні. Завдяки проведенню у роботі теоретичним дослідженням можна проводити аналіз різних варіантів конкретних експериментальних конструкцій ЛВЕ. У роботі з метою підвищення потужності вихідного терагерцового випромінювання та зменшення повздовжніх габаритів ЛВЕ, що досліджуються, запропоновано використовувати генероване електричне поле накачки та електричне поле підпору. В інших пристроях релятивістської плазмової електроніки подібні явища мають також місце, їх застосування дозволить підвищити ефективність роботи таких приладів.

Повнота викладу матеріалів дисертації в опублікованих працях, персональний внесок здобувача

Результати дисертаційної роботи опубліковано у 17 працях, з яких 6 статей у журналах, що індексуються наукометричними базами Scopus та WoS та належать до кuartилів Q3 – Q4, та 1 стаття у матеріалах Міжнародних наукових конференцій, що індексуються наукометричною базою Scopus, 10 тез доповідей.

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. A. V. Lysenko, A. Yu. Brusnik, I. I. Volk, M. A. Korovai, **S. S. Ilin**, O. L. Bunetskyi, “On Theory of Superheterodyne FELs with Longitudinal Electrostatic Undulator”, *Journal of Nano- and Electronic Physics*, Vol. 12, № 4, 2020, P. 004037-1 – 004037-5. doi: 10.21272/jnep.12(4).04037. (Scopus, Q3, фахове видання категорії A).

2. A. V. Lysenko, **S. S. Ilin**, “Multiharmonic Interactions of Longitudinal Waves in Amplification Section of Superheterodyne Free Electron Laser”, *Journal of Nano- and Electronic Physics*, Vol. 14, № 5, 2022, P. 05006-1–05006-6. doi: 10.21272/jnep.14(5).05006. (Scopus, Q4, фахове видання категорії A).

3. A. V. Lysenko, **S. S. Ilin**, “The effect of the generated pump electric field on the amplification properties of a superheterodyne parametric free-electron laser”, *Journal of Nano- and Electronic Physics*, Vol. 15, № 5, 2023, P. 05022-1–05022-5. doi: 10.21272/jnep.15(5).05022. (Scopus, Q4, фахове видання категорії A).

4. A.V. Lysenko, O.I. Voroshylo, **S.S. Ilin**, “Influence of Generated Pump Electric Field on Multiharmonic Interaction of Waves in Amplification Section of Superheterodyne FEL”, *Problems of Atomic Science and Technology*, № 6, 2023, P. 186–191. doi: 10.46813/2023-148-186. (Scopus, Q3, фахове видання категорії A).

5. A. V. Lysenko, **S. S. Ilin**, "Influence of quasi-electrostatic support on amplification of space charge waves in amplification section of a superheterodyne free electron laser", *Chinese Physics B*, Vol. 34, № 1, 2025, P. 014102-1–014102-6. doi: 10.1088/1674-1056/ad8869. (Scopus, Web of Science, Q3).

6. A. V. Lysenko, **S. S. Ilin**, "Cubic Nonlinear Theory of Superheterodyne Parametric H-ubitron FEL with Section for Amplifying Longitudinal Space Charge Waves", *Journal of Nano- and Electronic Physics*, Vol. 17, № 2, 2025, P. 02004-1–02004-6. doi: 10.21272/jnep.17(2).02004. (Scopus, Q3, фахове видання категорії A).

Наукові праці апробаційного характеру

7. A. V. Lysenko, **S. S. Ilin**, "Effect of a generated additional pump electrostatic field on the space charge waves amplification in free electron lasers with an electrostatic undulator", *Electronics and Applied Physics: 18th International Conference*, Kyiv, Ukraine, 18-22 October 2022, pp. 105 – 106.

8. **S. S. Ilin**, A. V. Lysenko, "Interactions of Multiharmonic Space Charge Waves in Amplification Section of Superheterodyne Free Electron Laser", *2022 IEEE 2nd Ukrainian Microwave Week (UkrMW)*. Kharkiv, Ukraine, 14-18 November 2022, pp. 246-249. doi: 10.1109/UkrMW58013.2022.10036989.

9. A. V. Lysenko, **S. S. Ilin**, "Effect of a generated pump electric field on a growth increment of the input signal in the parametric superheterodyne free electron laser in quadratic nonlinear approximation", *Electronics and Applied Physics : 19th International Conference*, Kyiv, Ukraine, 17-21 October 2023, pp. 59 – 60. Available: http://aphys.univ.kiev.ua/images/APHYS_2023_book_site.pdf (accessed on: May 23, 2025)

10. A. V. Lysenko, **S. S. Ilin**, "Dynamics of space charge waves in the amplification section of a superheterodyne FEL with a quasi-electrostatic field", *Electronics and Applied Physics : 20th International Conference*, Kyiv, Ukraine, 22-25 October 2024, pp. 160 – 161. <https://ir.library.knu.ua/handle/15071834/5431> (accessed on: May 23, 2025).

11. О. Лисенко, М. Коровай, Ю. Волк, **С. Ільїн**, «Моделювання підсилення електромагнітних хвиль супергетеродинним ЛВЕ з повздовжнім електростатичним ондулятором», *Міжнародна науково-технічна конференція «Інформатика, математика, автоматика» (ІМА2020)*, Суми, Україна, 20-24 квітня 2020, С. 234.

12. О. Лисенко, М. Коровай, **С. Ільїн**, І. Литвиненко, В. Перебейнос, «Моделювання динаміки хвиль у параметричних лазерах на вільних електронах з електростатичним ондулятором у кубічному нелінійному наближенні», *Міжнародна науково-технічна конференція «Інформатика, математика, автоматика» (ІМА2021)*, Суми, Україна, 19-23 квітня 2021, С. 146.

13. О. Лисенко, **С. Ільїн**, Є. Бондаренко, «Застосування методу гармонічного балансу для моделювання множинних трихвильових параметричних резонансів у ЛВЕ з електростатичним ондулятором»,

Міжнародна науково-технічна конференція «Інформатика, математика, автоматика» (ІМА2022), Суми, Україна – Нур-Султан, Казахстан, 18-22 квітня 2022, С. 146. Available: <https://drive.google.com/file/d/1gigVCRvXxfBUf4Kj3fkJfeF2m7c4hZua/view> (accessed on: May 23, 2025).

14. О. Лисенко, С. Ільїн, Д. Піддубна, «Генерування додаткового електричного поля у секції підсилення у супергетеродинному ЛВЕ з електростатичним ондулятором», *Міжнародна науково-технічна конференція «Інформатика, математика, автоматика» (ІМА2022)*, Суми, Україна – Нур-Султан, Казахстан, 18-22 квітня 2022, С. 151. Available: <https://drive.google.com/file/d/1gigVCRvXxfBUf4Kj3fkJfeF2m7c4hZua/view> (accessed on: May 23, 2025).

15. О. Лисенко, С. Ільїн, «Підсилення хвиль просторового заряду з урахуванням ефекту генерації додаткового поля накачки в супергетеродинному лазері на вільних електронах з електростатичним ондулятором», *Міжнародна науково-технічна конференція «Інформатика, математика, автоматика» (ІМА2023)*, Суми, Україна – Астана, Казахстан, 24-28 квітня 2023, С. 283. Available: <https://drive.google.com/file/d/1YDGNhbgZY6dfsqwN6P0BcEpcq6CuCKmj/view> (accessed on: May 23, 2025).

16. О. Лисенко, С. Ільїн, «Вплив електричного поля підпору на підсилення хвиль просторового заряду в супергетеродинному лазері на вільних електронах з електростатичним ондулятором», *Міжнародна науково-технічна конференція «Інформатика, математика, автоматика» (ІМА2024)*, Суми, Україна – Астана, Казахстан, 22-26 квітня 2024, С. 286. Available: <https://drive.google.com/file/d/1jjUd3KWmCmrPnOXTnZZSGbZIbsWWBPzU/view?pli=1> (accessed on: May 23, 2025).

17. О. Лисенко, С. Ільїн, «Аналіз динаміки електромагнітного сигналу в параметричному ЛВЕ супергетеродинного типу з електростатичним ондулятором», *Міжнародна науково-технічна конференція «Інформатика, математика, автоматика» (ІМА2025)*, Суми, Україна – Астана, Казахстан, 21-25 квітня 2025, С. 369. Available: <https://drive.google.com/file/d/1jq0nUXrLNgfALXmooC8ToxNn4w-TgjXY/view> (accessed on: May 23, 2025).

Наведені публікації містять результати безпосередньої роботи здобувача на окремих етапах дослідження, повною мірою відображають основні положення та висновки роботи. Авторська участь здобувача в опублікованих наукових працях погоджена зі співавторами.

Оцінка мови та стилю дисертації

Матеріали дисертації викладено хорошою науковою українською мовою, за формально-логічною структурою, послідовно, з дотриманням наукового стилю написання.

Відповідність фаху

Дисертаційна робота відповідає спеціальності 105 – Прикладна фізика та наноматеріали.

Відсутність (наявність) порушення академічної доброчесності.

За результатами перевірки дисертаційної роботи Ільїна Станіслава Сергійовича на тему «Вплив генерованого електричного поля накачки та електричного поля підпору на підсилювальні властивості супергетеродинного параметричного лазера на вільних електронах», на наявність ознак академічного плагіату встановлено коректність посилань на першоджерела для текстових та ілюстративних запозичень; навмисних спотворень не виявлено. Звідси можна зробити висновок про відсутність порушень академічної доброчесності.

Загальний висновок

1. Дисертаційна робота Ільїна Станіслава Сергійовича за актуальністю проблеми, методичними підходами, обсягом, ґрунтовністю аналізу та інтерпретацією отриманих даних, повнотою викладу принципів наукових положень, науково-теоретичним та практичним значенням повністю відповідає вимогам п. 6 «Порядку присудження ступеня доктор 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, а дисертант, з урахуванням виконання у повному обсязі освітньої складової освітньо-наукової програми та індивідуального плану наукової роботи, заслуговує присудження ступеня доктора філософії з галузі знань 10 «Природничі науки» за спеціальністю 105 «Прикладна фізика та наноматеріали».

Голова апробаційної ради
зі спеціальності

105 «Прикладна фізика
та наноматеріали»,
доцент кафедри ЕЗПФ,
доктор фіз-мат. наук, професор

Юрій ШКУРДОДА

Секретар апробаційної ради
зі спеціальності

105 «Прикладна фізика
та наноматеріали»,
доцент кафедри ЕЗПФ,
кандидат фіз-мат. наук, доцент

Юрій ШАБЕЛЬНИК