

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Волк Юрій Юрійович



УДК 621.373

**МУЛЬТИГАРМОНІЧНІ ДВОПОТОКОВІ СУПЕРГЕТЕРОДИННІ ЛВЕ
З ГВИНТОВИМИ ЕЛЕКТРОННИМИ ПУЧКАМИ**

Спеціальність 01.04.01 – фізика приладів, елементів і систем

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Суми – 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Сумському державному університеті
Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник – доктор фізико-математичних наук, професор
Лисенко Олександр Володимирович,
Сумський державний університет,
завідувач кафедри прикладної математики
та моделювання складних систем.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор
Шматько Олександр Олександрович,
Харківський національний університет
імені В. Н. Каразіна,
професор кафедри фізики НВЧ;

кандидат фізико-математичних наук
Бугай Олександр Миколайович,
Інститут прикладної фізики НАН України (м. Суми),
заступник завідувача відділу ядерно-фізичних методів
дослідження.

Захист відбудеться « 53 » травня 2019 р. о 13:00 на засіданні спеціалізованої вченої
ради Д 55.051.02 при Сумському державному університеті за адресою: 40007,
м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2, корпус БЦ, ауд. 307,
email: d55.051.02@sumdu.edu.ua.

Із дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Сумського державного
університету за адресою: 40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2, а також на
сайті інституційного репозитарію СумДУ. Режим доступу:
<https://sumdu.edu.ua/uk/science/science-info/scientific-infrastructure/specialized-council/111-55-051-02.html>

Автореферат розіслано « 25 » квітня 2019 року.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради



Ю. О. Шкурда

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Створення джерел потужного випромінювання в міліметровому–інфрачервоному діапазоні є одним з основних перспективних напрямків розвитку релятивістської плазмової електроніки. Не зважаючи на те, що випромінювання цього діапазону широко використовується, пристроїв, здатних створювати потужне випромінювання в міліметровому–інфрачервоному діапазоні, існує досить мало. Серед різних пристроїв цього діапазону необхідно виділити супергетеродинні лазери на вільних електронах. Особливістю цих приладів є те, що порівняно з іншими типами лазерів на вільних електронах (ЛВЕ) вони характеризуються надзвичайно високими підсилювальними властивостями, меншими габаритами. Це обумовлено тим, що супергетеродинні ЛВЕ використовують додатковий механізм підсилення, пов'язаний із пучковими нестійкостями. Так, двопотоковий супергетеродинний лазер на вільних електронах (ДСЛВЕ) використовує як додатковий механізм підсилення двопотокову нестійкість. Як відомо, пучкові нестійкості характеризуються виключно високими темпами підсилення, що й обумовлює вищезазначені властивості супергетеродинних ЛВЕ.

Відомо, що ДСЛВЕ можуть працювати і в режимах, коли генерується велика кількість (десятки і більше) гармонік електромагнітного поля із зіставними амплітудами. Тобто такі мультигармонічні ДСЛВЕ здатні формувати потужні електромагнітні хвилі з широким частотним спектром, зокрема, потужні ультракороткі кластери електромагнітного поля. Такі ультракороткі електромагнітні кластери широко використовуються для ряду фундаментальних та прикладних досліджень у галузі фізики, хімії, біології, медицини тощо. Ця властивість мультигармонічних ДСЛВЕ обумовлена тим, що хвилі просторового заряду (ХПЗ), що підсилюються завдяки двопотоковій нестійкості (додатковому механізму підсилення), характеризуються лінійними дисперсійними залежностями. Це призводить до того, що для гармонік ХПЗ, частота яких менша за критичну частоту двопотокової нестійкості, виконуються умови трихвильових параметричних резонансів для великої кількості гармонік. У результаті цього між гармоніками таких хвиль виникає велика кількість трихвильових параметричних резонансів (множинні резонансні взаємодії), що спричиняють збудження десятків і більше гармонік.

Використання гвинтових релятивістських електронних пучків (РЕП) замість прямолінійних у пристроях сильнострумової електроніки може істотно змінювати їх характеристики. Тому можна припустити, що використання гвинтових РЕП і у мультигармонічних ДСЛВЕ дозволить підвищити ефективність їх роботи порівняно з тими, які використовують прямолінійні РЕП. Необхідно також зауважити, що у мультигармонічних ДСЛВЕ з гвинтовими РЕП на множинні резонансні взаємодії між гармоніками хвиль різного типу накладається також осциляторний рух електронів у поздовжньому магнітному полі. Тому загальна динаміка хвиль та частинок у таких пристроях є достатньо складною. Таким чином, вивчення мультигармонічних процесів у мультигармонічних двопотокових

супергетеродинних лазерах на вільних електронах з гвинтовими електронними пучками з метою пошуку більш ефективних режимів роботи, коли формується потужна мультигармонічна електромагнітна хвиля з більш широким частотним спектром, зменшуються габарити таких пристроїв, тощо, є важливим та актуальним завданням.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі прикладної математики та моделювання складних систем Сумського державного університету. Матеріали дисертаційної роботи пов'язані з виконанням таких держбюджетних тем: «Множинні резонансні взаємодії у плазмово-пучкових супергетеродинних лазерах на вільних електронах» (№ 0114U003770, 2014–2016 рр.); «Мультигармонічні резонансні взаємодії у двопотокових супергетеродинних лазерах на вільних електронах з гвинтовими електронними пучками» (№ 0116U006732, 2017–2018 рр.); «Мультигармонічні плазмово-пучкові та двопотокові супергетеродинні лазери на вільних електронах з гвинтовими електронними пучками» (№ 0117U002253, 2017–2019 рр.). Дисертант брав участь як виконавець у проведенні наукових досліджень у вищезазначених НДР.

Мета і завдання досліджень. Метою роботи є встановлення фізичних закономірностей, пов'язаних із формуванням у мультигармонічних двопотокових супергетеродинних лазерах на вільних електронах з гвинтовими електронними пучками потужного електромагнітного випромінювання з широким частотним спектром, визначення оптимальних умов роботи таких пристроїв.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

– побудувати систему самоузгоджених кубічно-нелінійних диференціальних рівнянь для амплітуд гармонік електромагнітних хвиль у мультигармонічних двопотокових супергетеродинних лазерах на вільних електронах Н-убітронного типу з гвинтовими електронними пучками з урахуванням множинних параметричних резонансів різного типу;

– визначити вплив на інкременти зростання, ширину частотного спектра, рівні насичення параметрів гвинтового релятивістського електронного пучка в пролітній секції двопотокового супергетеродинного лазера на вільних електронах;

– визначити оптимальні умови формування потужного електромагнітного випромінювання з широким частотним спектром у мультигармонічному двопотоковому супергетеродинному лазері на вільних електронах Н-убітронного типу з гвинтовими електронними пучками.

Об'єкт дослідження – процеси вимушеного випромінювання електромагнітних хвиль релятивістськими електронними пучками в лазерах на вільних електронах.

Предмет дослідження – динаміка електромагнітних хвиль у мультигармонічних супергетеродинних двопотокових лазерах на вільних електронах Н-убітронного типу з гвинтовими електронними пучками з урахуванням множинних трихвильових параметричних взаємодій різного типу.

Методи дослідження. У дисертаційній роботі проведено вивчення динаміки електромагнітних хвиль у мультигармонічних двопотокових супергетеродинних

лазерах на вільних електронах на основі квазігідродинамічного рівняння, рівняння неперервності та рівнянь Максвелла. Відповідно до поставлених завдань для розв'язання задач руху та рівняння неперервності використовували методи ієрархічного підходу до теорії коливань і хвиль, а саме метод усереднених характеристик. Для розв'язання польової задачі використовували метод повільно змінних амплітуд. Також використовували стандартні числові та числово-аналітичні методи.

Наукова новизна одержаних результатів

1. Уперше запропоновано використовувати в мультигармонічних двопотокових супергетеродинних лазерах на вільних електронах гвинтові електронні пучки. З'ясовано, що такі пристрої мають менші поздовжні габарити та здатні формувати мультигармонічні електромагнітні хвилі з більш широким частотним спектром порівняно з ДСЛВЕ, які використовують прямолінійні електронні пучки.
2. Уперше одержано в кубічно-нелінійному наближенні самоузгоджену систему диференціальних рівнянь для амплітуд гармонік хвиль мультигармонічних двопотокових супергетеродинних лазерів на вільних електронах Н-убітронного типу з гвинтовими РЕП. Виявлені та враховані множинні трихвильові резонансні взаємодії різного типу, зокрема й пов'язані з обертальним рухом електронів у фокусувальному магнітному полі. Показано, що множинні взаємодії хвиль у таких системах є визначальними для формування електромагнітного сигналу з широким частотним спектром.
3. Уперше встановлено, що інкременти зростання хвиль просторового заряду у двопотокових супергетеродинних ЛВЕ з гвинтовими РЕП зростають за умови збільшення кута вльоту електронного пучка відносно фокусувального магнітного поля. Уперше показано, що критична частота двопотокової нестійкості у гвинтових двопотокових РЕП зростає зі збільшенням цього кута вльоту. Завдяки цьому формування мультигармонічної хвилі просторового заряду у гвинтових РЕП відбувається на менших довжинах та має більшу ширину частотного спектра порівняно з прямолінійними РЕП.
4. Уперше показано, що в разі використання мультигармонічного вхідного сигналу з вузьким частотним спектром у мультигармонічних ДСЛВЕ-підсилювачах з гвинтовими РЕП формування потужної мультигармонічної електромагнітної хвилі відбувається на довжинах, у два і більше разів менших порівняно з системами, на вхід яких подається монохроматичний вхідний сигнал.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблена в дисертаційній роботі самоузгоджена кубічно-нелінійна теорія мультигармонічних двошвидкісних супергетеродинних лазерів на вільних електронах з гвинтовими релятивістськими електронними пучками дозволяє визначити оптимальні параметри пристроїв, здатних формувати потужні електромагнітні хвилі з широким частотним спектром в міліметровому–інфрачервоному діапазоні довжин хвиль. За допомогою побудованої теорії можна аналізувати варіанти конкретних експериментальних конструкцій, вона може бути основою для розрахунків формувачів надкоротких (зокрема й фемтосекундних) кластерів електромагнітних хвиль. Одержані у роботі алгоритми

аналізу множинних взаємодій різного типу можна використовувати також для дослідження динаміки електромагнітних хвиль в інших пристроях релятивістської плазмової електроніки.

Особистий внесок здобувача Здобувач повноцінно брав участь на всіх етапах дослідження в усіх опублікованих працях: обговоренні постановлення завдання, проведенні аналітичних розрахунків, розробленні комп'ютерних програм, інтерпретації одержаних результатів, підготовленні їх до опублікування. Усі наукові положення і висновки, винесені на захист, належать авторові дисертації та викладені в працях [1-23]. У працях [1, 2, 7-9] автором дисертації було побудовано у слабосигнальному наближенні систему диференціальних рівнянь для амплітуд гармонік хвиль просторового заряду, створено комп'ютерні програми та проведено комп'ютерне моделювання формування мультигармонічних хвиль за умови вльоту електронного пучка під різним кутом відносно фокусувального магнітного поля. Здобувач у працях [3, 4, 10–13, 23] разом із науковим керівником проф. О. В. Лисенком побудував кубічно-нелінійну теорію множинних взаємодій гармонік хвиль у пролітній секції мультигармонічних двопотокових супергетеродинних ЛВЕ, розробив комп'ютерну програму та провів аналіз фізичних процесів. У працях [5, 6, 14–19] дисертант одержав самоузгоджену систему диференціальних рівнянь для амплітуд гармонік хвиль мультигармонічних двопотокових супергетеродинних ЛВЕ для секції накачування та прикінцевої секції, брав участь у створенні комп'ютерної програми, провів аналіз динаміки мультигармонічних електромагнітних хвиль. У працях [20–22] дисертант разом із співавторами провів модернізацію методу усереднених характеристик для використання його у теорії мультигармонічних двопотокових супергетеродинних лазерів на вільних електронах з гвинтовими електронними пучками. Основну частину одержаних наукових результатів дисертант особисто доповів на міжнародних та національних конференціях [7–15, 17–22].

Апробація результатів дисертації. Основні наукові результати дисертаційної роботи викладено в доповідях та обговорено на таких конференціях: Міжнародна конференція молодих вчених і аспірантів «ІЕФ-2013», «ІЕФ-2015» (Ужгород, 2013, 2015 pp.); 14th, 17th International Young Scientists Conference Optics and High Technology Material Science – SPO (Київ, 2013, 2016 pp.); X, XII, XIII International Conference «Electronics and Applied Physics» (Київ, 2014, 2016, 2017 pp.); 9th International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves, MSMW 2016 (Харків, 2016 p.); 16th, 17th International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory, MMET (Львів, Київ, 2016, 2018 pp.); 41st International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, IRMMW-THz 2016 (Копенгаген, 2016 p.); 2017 IEEE Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium, MRRS 2017 (Київ, 2017 p.); 9th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS) (Одеса, 2018); International Conference of Students and Young Scientists in Theoretical and Experimental Physics «Heureka» (Львів, 2017, 2018 pp.); International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics UkrMiCo (Одеса, 2017, 2018 pp.).

Публікації. Результати дисертаційної роботи опубліковані у 23 наукових працях, серед яких 5 статей – у виданнях, що індексуються наукометричними базами Scopus та/або Web of Science; 1 стаття – у наукових фахових виданнях України, 8 статей – у матеріалах міжнародних наукових конференцій, 7 з яких у виданнях, що індексуються наукометричними базами Scopus та/або Web of Science; 8 тез доповідей конференцій, 1 стаття у нефарховому виданні.

Структура та обсяг дисертаційної роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, загальних висновків та списку використаних джерел. Дисертацію викладено на 148 сторінках, із яких 105 сторінок основного тексту. Робота містить 24 рисунка, список використаних джерел складається з 160 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовані мета та основні завдання дослідження, визначені наукова новизна та практичне значення одержаних результатів, зазначений зв'язок дисертаційної роботи з науково-дослідними роботами, подана інформація про особистий внесок здобувача, апробацію результатів та структуру роботи.

У першому розділі «Двопотокові супергетеродинні лазери на вільних електронах (огляд літератури)» проведено аналіз сучасного стану досліджень двопотокових супергетеродинних ЛВЕ, здатних формувати потужну електромагнітну хвилю в субміліметровому–інфрачервоному діапазоні довжин хвиль.

Було з'ясовано, що двопотокові супергетеродинні ЛВЕ мають ряд переваг порівняно з іншими типами лазерів на вільних електронах. По-перше, двопотокові супергетеродинні ЛВЕ характеризуються надзвичайно високими темпами підсилення і, отже, меншими габаритами. Така властивість двопотокових супергетеродинних ЛВЕ обумовлена використанням як додаткового механізму підсилення двопотокової нестійкості. Це спричинено тим, що двопотокова нестійкість має виключно високі підсилювальні властивості.

По-друге, було також виявлено, що хвилі просторового заряду, які підсилюються завдяки двопотоковій нестійкості, характеризуються лінійними дисперсійними залежностями. Через це умови трихвильових параметричних резонансів виконуються для великої кількості гармонік, що призводить до виникнення в електронних пучках великої кількості трихвильових параметричних резонансних взаємодій між гармоніками хвилі просторового заряду. Тобто мають місце множинні трихвильові взаємодії. Завдяки цьому виникає можливість перетворювати енергію мультигармонічних хвиль просторового заряду на енергію потужних електромагнітних хвиль із широким частотним спектром, зокрема формувати потужні ультракороткі кластери електромагнітного поля. З літературних джерел з'ясовано, що режим формування потужної мультигармонічної електромагнітної хвилі у двопотокових ЛВЕ реалізується за умови, якщо частота першої гармоніки сигналу є меншою за критичну частоту двопотокової нестійкості.

Про такі пристрої можна говорити як про мультигармонічні двопотокові супергетеродинні ЛВЕ, основне призначення яких – формування потужної електромагнітної хвилі з широким частотним спектром. Тобто двопотокові супергетеродинні ЛВЕ можуть працювати як у режимі формування мультигармонічної електромагнітної хвилі (за умови, якщо частота першої гармоніки сигналу є меншою за критичну частоту двопотокової нестійкості), так і у режимі максимального підсилення сигналу (частота першої гармоніки збігається з частотою, що відповідає максимальному інкременту підсилення двопотокової нестійкості).

Було з'ясовано, що до праць дисертанта були проведені дослідження мультигармонічних двопотокових супергетеродинних ЛВЕ лише з *прямолінійними* електронними пучками. Водночас у техніці лазерів на вільних електронах широко використовують гвинтові електронні пучки. По-перше, це пов'язано з утриманням сильнострумових релятивістських електронних пучків. По-друге, в ряді праць продемонстровано, що використання гвинтових електронних пучків призводить до збільшення підсилювальних характеристик ЛВЕ. Необхідно зазначити, що такі висновки були зроблені також і для двопотокових супергетеродинних ЛВЕ, що працюють у режимі максимального підсилення сигналу. У зв'язку з цим постають завдання провести аналіз мультигармонічних процесів у мультигармонічних двопотокових супергетеродинних ЛВЕ, в яких використовують гвинтові релятивістські електронні пучки, знайти більш ефективні режими роботи.

Виходячи з огляду літературних джерел, також встановлено, що завдання дослідження динаміки мультигармонічних хвиль у мультигармонічних ДСЛВЕ, в яких мають місце множинні резонансні взаємодії між гармоніками хвиль різного типу, є доволі складною математичною задачею. Тому в першому розділі також проаналізовано теоретичні підходи до вивчення динаміки хвиль у лазерах на вільних електронах. З'ясовано, що найбільш ефективними методами дослідження динаміки хвиль у мультигармонічних ДСЛВЕ є методи ієрархічного підходу до теорії коливань та хвиль, а саме метод усереднених характеристик.

У другому розділі «Множинні резонансні взаємодії в двопотоковому супергетеродинному лазері на вільних електронах клістронного типу з гвинтовими електронними пучками» розглянуто узагальнену схему мультигармонічного двопотокового супергетеродинного ЛВЕ клістронного типу з гвинтовими РЕП та проведено аналіз типів множинних резонансних взаємодій, що мають місце в досліджуваному пристрої. Також сформульовано припущення щодо моделей, розглядуваних у дисертаційній роботі.

У *першому* підрозділі розглянуто узагальнену схему мультигармонічного ДСЛВЕ-клістрона Н-убітронного типу з гвинтовим РЕП (рис. 1), яка в наступних розділах детально аналізується. Пристрій складається з трьох секцій: секції модуляції I, пролітної секції II і прикінцевої секції III. Уздовж осі приладу Z (рис. 1) рухається гвинтовий двопотоковий РЕП 2, послідовно проходячи через усі секції ДСЛВЕ. Гвинтовий двопотоковий РЕП знаходиться у фокусувальному магнітному

полі з індукцією \mathbf{B}_0 , спрямованому вздовж осі Z приладу. Електронний пучок 2 складається з двох парціальних взаємопроникних гвинтових електронних потоків із близькими за значеннями парціальними релятивістськими швидкостями

v_1, v_2 ($v_1 - v_2 \ll v_1, v_2$). Швидкості електронів цих пучків спрямовані під кутом α відносно фокусувального магнітного поля.

На вхід секції модуляції I, в якій створене періодичне реверсивне поперечне циркулярно-поляризоване Н-убітронне магнітне поле 3 (хвильове число першої гармоніки $k_{2,1}$), подається електромагнітний сигнал 1, перша гармоніка якого характеризується частотою $\omega_{1,1}$ і хвильовим числом $k_{1,1}$. У роботі розглядається два варіанти вхідного електромагнітного сигналу: монохроматичний сигнал та мультигармонічний сигнал з вузькою шириною частотного спектра. У результаті трихвильового параметричного резонансу хвилі сигналу $\{\omega_{1,1}, k_{1,1}\}$ і з магнітним полем модулятора I $\{k_{2,1}\}$ у двопотоковому електронному пучку збуджується хвиля просторового заряду, перша гармоніка якого має частоту $\omega_{3,1}$ й хвильове число $k_{3,1}$.

Далі промодульований електронний пучок 2 входить у пролітну секцію II, електромагнітна хвиля сигналу 1 на вході до цієї секції поглинається. Основними призначеннями пролітної секції II є підсилення й інтенсивне збудження вищих гармонік ХПЗ як за рахунок множинних трихвильових резонансних взаємодій гармонік ХПЗ, так і за рахунок двопотокової нестійкості. Для реалізації ефективного збудження вищих гармонік ХПЗ частоту першої гармоніки ХПЗ $\omega_{3,1}$, що збігається з частотою першої гармоніки сигналу $\omega_{1,1}$, вибираємо набагато меншою за критичну частоту двопотокової нестійкості ω_{cr} . Завдяки цьому всі гармоніки, частота яких менша від критичної частоти ω_{cr} будуть підсилюватися за рахунок двопотокової нестійкості. Також урахуємо, що ХПЗ, які зростають за рахунок двопотокової нестійкості, характеризуються лінійною дисперсійною залежністю. Тому між гармоніками ХПЗ виникає велика кількість трихвильових параметричних резонансних взаємодій, про які говоримо як про множинні резонансні взаємодії. Це призводить до інтенсивного збудження й підсилення гармонік ХПЗ. Відзначимо, що у разі вибору частоти першої гармоніки ХПЗ $\omega_{3,1}$ набагато меншою, ніж критична частота двопотокової нестійкості ω_{cr} , інкремент зростання гармонік ХПЗ буде збільшуватися зі збільшенням номера гармоніки аж до оптимальної частоти

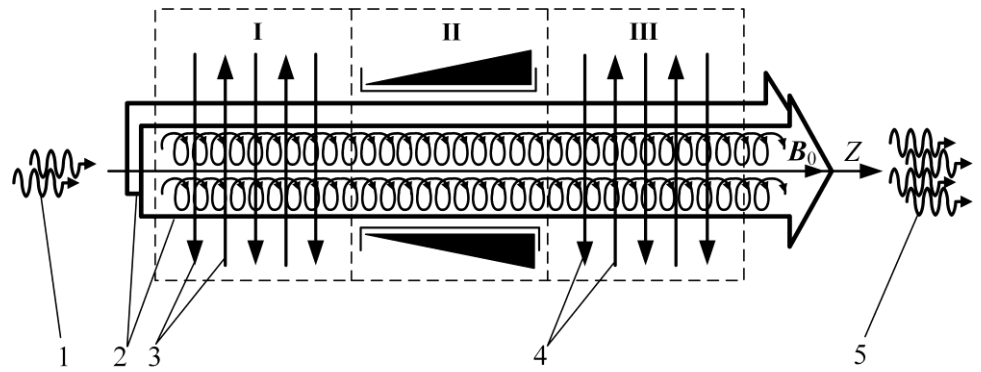


Рисунок 1 – Схема мультигармонічного ДСЛВЕ-клістрона Н-убітронного типу з гвинтовим двопотоковим РЕП

$\omega_{\text{opt}} = \sqrt{3/8} \cdot \omega_{\text{cr}}$, яка відповідає максимальному інкременту зростання. Через це в пролітній секції II стає можливим формування ХПЗ із широким частотним спектром та аномальною ділянкою, на якій більш високі гармоніки мають більші амплітуди.

Після проходження пролітної секції II гвинтовий РЕП, в якому відбулося збудження вищих гармонік ХПЗ, спрямовується на вхід прикінцевої секції III. Основним призначенням прикінцевої секції III є перетворення мультигармонічної хвилі просторового заряду на потужну мультигармонічну електромагнітну хвилю сигналу. Для цього у прикінцевій секції створене мультигармонічне Н-убітронне поле 4. Завдяки параметричним резонансам між гармоніками ХПЗ і гармоніками мультигармонічного поля накачування здійснюється генерація мультигармонічного електромагнітного сигналу 5 та його підсилення. Фактично, тут відбувається зворотне перетворення енергії мультигармонічної ХПЗ на енергію мультигармонічного електромагнітного сигналу. При цьому для кожної з гармонік мультигармонічної ХПЗ виконується умова параметричного резонансу з відповідними гармоніками поля накачування й електромагнітного сигналу. В цьому підрозділі також наведені вихідні рівняння, що описують динаміку мультигармонічних хвиль у мультигармонічному ДСЛВЕ.

У *другому* підрозділі розглянуті множинні резонансні взаємодії, що мають місце в досліджуваному пристрої. З'ясовано, що тут реалізуються три групи множинних трихвильових параметричних резонансних взаємодій. Перша група множинних взаємодій пов'язана з параметричними резонансами між гармоніками хвилі просторового заряду в усіх секціях пристрою. Умова таких трихвильових параметричних резонансів має вигляд:

$$k_{3,m_1} = k_{3,m_2} + k_{3,m_3}, \quad \omega_{3,m_1} = \omega_{3,m_2} + \omega_{3,m_3}, \quad (1)$$

де m_1, m_2, m_3 є номерами гармонік ХПЗ. З'ясовано, що у гвинтовому РЕП дисперсійна залежність хвилі просторового заряду є лінійною. Тому умова (1) виконується, якщо номери гармонік задовольняють співвідношення $m_1 = m_2 + m_3$. Цю умову задовольняє величезна кількість гармонік, що й призводить до реалізації великої множини трихвильових резонансів у гвинтовому РЕП. Потрібно зазначити, що вище названі гармоніки ХПЗ підсилюються не лише за рахунок множинних взаємодій, а й за рахунок двопотокової нестійкості. Завдяки цьому у гвинтовому РЕП створюється мультигармонічна ХПЗ з аномальною ділянкою спектра, коли більш високі гармоніки мають більш високу амплітуду. Друга група множинних резонансних взаємодій обумовлена трихвильовими резонансами між гармоніками електромагнітної хвилі сигналу за умови, що перша гармоніка сигналу істотно більша за плазмову частоту пучка. У цьому разі дисперсійну залежність електромагнітної хвилі сигналу можна вважати квазілінійною. Умова трихвильових параметричних взаємодій є подібною до (1). Третя група множинних резонансних взаємодій реалізується відповідно між m -ми гармоніками мультигармонічних полів електромагнітної хвилі, магнітного поля накачування й хвилі просторового заряду. Умова трихвильового параметричного резонансу таких хвиль має вигляд:

$\omega_{3,m} = \omega_{1,m}$, $k_{3,m} = k_{1,m} + k_{2,m}$. Наявність обертального руху електронів у поздовжньому магнітному полі приводить до виникнення додаткових трихвильових параметричних резонансних взаємодій.

У *третьому* підрозділі розглянуто особливості застосування методу усереднених характеристик для розв'язання задачі руху і неперервності в мультигармонічному двопотоковому супергетеродинному лазері на вільних електронах з урахуванням множинних параметричних резонансів гармонік електромагнітних хвиль, що відбуваються у гвинтових електронних пучках. У мультигармонічному ДСЛВЕ з гвинтовими РЕП на множинні резонансні взаємодії накладається обертальний рух електронів у поздовжньому фокусувальному магнітному полі. Тому виникає необхідність модернізації методу усереднених характеристик для врахування додаткових ларморівських осциляцій, що мають місце в електронному пучку. В алгоритмі асимптотичного інтегрування була використана заміна змінних, пов'язана з обертальним рухом електронів у поздовжньому магнітному полі, що спрощує алгоритм асимптотичного інтегрування задачі руху заряджених частинок у фокусувальному магнітному полі.

У **третьому розділі** «Формування ХПЗ з широким частотним спектром у пролітній секції ДСЛВЕ з гвинтовим РЕП» проаналізовано динаміку хвилі просторового заряду в пролітній секції мультигармонічного супергетеродинного ЛВЕ з гвинтовим РЕП, з'ясовано вплив на рівні насичення та ширину спектра мультигармонічної ХПЗ параметрів досліджуваної системи. Процеси, описані в цьому розділі, мають місце не лише у пролітній секції мультигармонічного ДСЛВЕ, а й в інших секціях цього пристрою.

У *першому* підрозділі конкретизована модель пролітної секції мультигармонічного ДСЛВЕ клістронного типу з гвинтовим РЕП. На вхід секції подається гвинтовий двопотоковий РЕП з близькими за модулем парціальними швидкостями та парціальними плазмовими частотами $\omega_{p,1}$, $\omega_{p,2}$. Вважаємо, що в поперечній площині такий пучок є однорідним, тепловим розкиданням швидкостей і зіткненнями електронів нехтуємо, просторовий заряд пучка вважаємо скомпенсованим іонним фоном. У секції модуляції І відбулося збудження ХПЗ. Тому на вході до пролітної секції електронний пучок уже є промодульованим, у ньому збуджена принаймні перша гармоніка ХПЗ.

У *другому* підрозділі одержано кубічно-нелінійну самоузгоджену систему диференціальних рівнянь для амплітуд гармонік хвилі просторового заряду, що описує динаміку мультигармонічної ХПЗ у пролітній секції ДСЛВЕ, гармоніки якої беруть участь у множинних трихвильових параметричних взаємодіях. Як вихідні використовуються квазігідродинамічне рівняння, рівняння неперервності й рівняння Максвелла. Для розв'язання задач руху та концентрації застосовується модернізований метод усереднених характеристик, а польова задача розв'язується за допомогою методу повільно змінних амплітуд. У результаті одержуємо систему самоузгоджених нелінійних диференціальних рівнянь для комплексних амплітуд гармонік напруженості електричного поля E_m зростаючої хвилі просторового заряду в кубічному наближенні

$$\begin{aligned}
& C_{2,3,m} \frac{d^2 E_{3,m}}{dz^2} + C_{1,3,m} \frac{dE_{3,m}}{dz} + D_{3,m} E_{3,m} = \\
& = C_{3,3,m} \left\langle E_z \cdot \sum_{m'=1}^N [E_{3,m'} \exp(ip_{3,m'}) / (im') + c.c.] \right\rangle_{P_{3,m}} + F_{3,m},
\end{aligned} \tag{1}$$

де $F_{3,m}$ ураховує кубічно-нелінійні доданки, зокрема й пов'язані з множинними трихвильовими резонансами. Коефіцієнти в системі рівнянь (1) також залежать від постійних складових швидкостей і концентрацій парціальних пучків, що змінюються в процесі нелінійної взаємодії гармонік ХПЗ. Тому систему рівнянь доповнимо рівняннями для постійних складових швидкостей v_q та концентрацій n_q парціальних пучків ($q = 1, 2$):

$$\frac{dv_{qz}}{dz} = V_q(E_1, E_2, \dots, E_N, v_q, n_q), \quad \frac{dn_q}{dz} = N_q(E_1, E_2, \dots, E_N, v_q, n_q). \tag{2}$$

У *третьому* підрозділі проведено аналіз динаміки хвиль просторового заряду у гвинтовому двошвидкісному РЕП у наближенні слабкого сигналу. Виходячи з дисперсійного рівняння для ХПЗ у гвинтовому двошвидкісному РЕП, одержано аналітичні наближені залежності максимального значення інкременту зростання $\Gamma(\omega_{opt})$ та критичної частоти двопотокової нестійкості ω_{cr} від кута між вектором швидкості двошвидкісного гвинтового електронного пучка та фокусувальним магнітним полем α :

$$\Gamma(\omega_{opt}) = \frac{\omega_p \sqrt{1 + \gamma_0^2 (v_0/c)^2 \sin^2 \alpha}}{2v_0 \gamma_0^{3/2} \cos \alpha}, \quad \omega_{cr} = \frac{(2\gamma_0)^{3/2} \omega_p (1 - \gamma_0^{-2}) \sqrt{1 + \gamma_0^2 (v_0/c)^2 \sin^2 \alpha}}{\Delta\gamma}. \tag{3}$$

У цих співвідношеннях ω_p – плазмова частота обох парціальних пучків; γ_0 , $\Delta\gamma$ – середнє значення та різниця парціальних релятивістських факторів двошвидкісного пучка відповідно; v_0 – середнє значення швидкості РЕП; c – швидкість світла. З цих виразів випливає, що збільшення кута α призводить до збільшення як максимального значення інкременту зростання, так і критичної частоти двопотокової нестійкості. На рисунку 2 подані залежності інкрементів зростання двопотокової нестійкості від частоти при різних кутах α , які отримані у результаті чисельного розв'язування дисперсійного рівняння. Розглянуто випадок, коли $\omega_{p1} = \omega_{p2} = \omega_p = 1,5 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1}$, $\gamma_1 = 4,8$, $\gamma_2 = 4,2$. Крива 1 відповідає $\alpha_1 = 0^\circ$, крива 2 – $\alpha_2 = 10^\circ$, крива 3 – $\alpha_3 = 20^\circ$, крива 4 – $\alpha_4 = 30^\circ$. Частота першої гармоніки $\omega_1 = 0,6 \cdot 10^{12} \text{ с}^{-1}$. Рисунок 2 підтверджує висновки, одержані з аналізу співвідношень (3): зі збільшенням кута вльоту α двопотокового пучка збільшуються як інкремент зростання Γ , так і критична частота ω_{cr} . У разі, якщо частота першої гармоніки ХПЗ ω_1 буде набагато меншою за критичну частоту, множинні параметричні резонанси між гармоніками ХПЗ будуть відбуватися в області частот $\omega_1 < \omega_m < \omega_{cr}$. З рисунка 2

впливає, що для гвинтових двопотокових пучків зі збільшенням кута вльоту пучка α ця область, а отже, і ширина частотного спектра мультигармонічної хвилі ХПЗ будуть збільшуватися. Збільшення інкремента Γ зі збільшенням кута α пов'язане зі зміною поздовжньої кінетичної енергії електронів пучка, що залежить від кута α . Зазначимо, що цей ефект має релятивістський характер. За умови збільшення кута вльоту пучка α з 0° до 30° інкремент зростання збільшується більше ніж на 30 %.

У четвертому підрозділі, використовуючи систему (1), що описує динаміку мультигармонічної хвилі просторового заряду в кубічному нелінійному наближенні, чисельно аналізується вплив на ширину спектра та рівні насичення ХПЗ таких параметрів двопотокового релятивістського електронного пучка, як кут вльоту пучка відносно фокусувального магнітного поля, середнє значення релятивістського фактора, різниця парціальних релятивістських факторів, плазмові частоти парціальних пучків.

На рисунку 3 поданий спектр мультигармонічної ХПЗ для кута вльоту $\alpha_3 = 20^\circ$, який обчислено за допомогою кубічної нелінійної системи рівнянь (1). Рисунок 3 підтверджує, що ширина спектра мультигармонічної ХПЗ у випадку гвинтового двопотокового РЕП є більшою, ніж для прямолінійного електронного пучка. У результаті кубічно-нелінійного аналізу з'ясовано, що при збільшенні кута вльоту пучка від $\alpha_1 = 0^\circ$ до $\alpha_3 = 20^\circ$ ширина спектра $\omega_{\min} - \omega_1$ збільшується в $\sim 1,5$ рази.

Із співвідношення (3) для критичної частоти впливає, що зі збільшенням середнього релятивістського фактора двопотокового гвинтового пучка γ_0 збільшується ширина частотного спектра. Кубічно-нелінійний аналіз підтверджує це. Так, при збільшенні середнього значення релятивістського фактора γ_0 з 4,5 до 5,0 ширина спектра $\omega_{\min} - \omega_1$ мультигармонічної ХПЗ у двопотоковому РЕП збільшується на 30 %. Необхідно зазначити, що при цьому рівень амплітуд гармонік ХПЗ зменшується на 30 %. У цьому разі також збільшується довжина насичення, тобто мультигармонічна ХПЗ формується на більших довжинах пристрою.

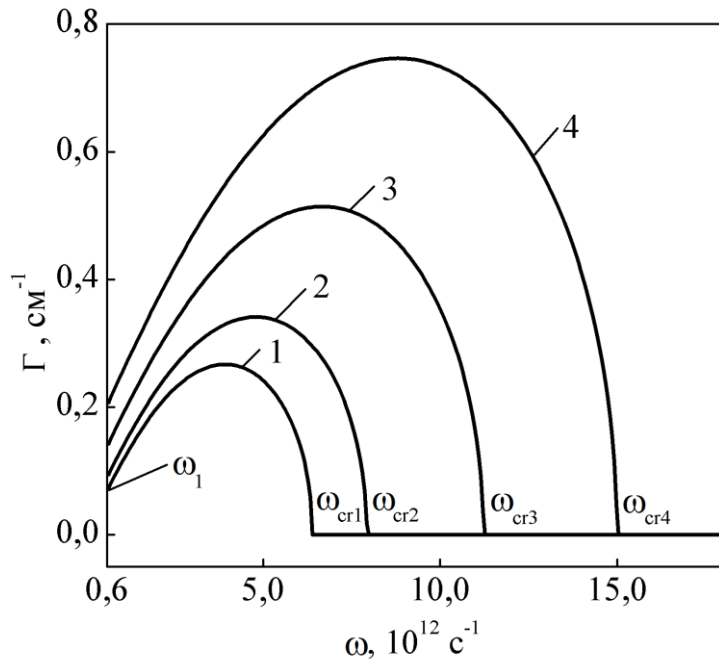


Рисунок 2 – Інкременти зростання двопотокової нестійкості при різних кутах вльоту пучка. Крива 1 відповідає випадку $\alpha_1 = 0^\circ$, крива 2 – випадку $\alpha_2 = 10^\circ$, крива 3 – випадку $\alpha_3 = 20^\circ$, крива 4 – випадку $\alpha_4 = 30^\circ$

Показано, що зменшення різниці релятивістських факторів $\Delta\gamma$ істотно впливає на ширину частотного спектра. Так, при зменшенні $\Delta\gamma$ з 0,3 до 0,2 ширина спектра $\omega_{\min} - \omega_1$ збільшується більше, ніж в 1,6 раза. При цьому темпи підсилення також зменшуються, рівні насичення стають меншими.

З'ясовано, що за умови збільшення середнього значення парціальних плазмових частот збільшуються як спектр мультигармонічної ХПЗ, так і рівні насичення. Так, при збільшенні середньої плазмової частоти з $1,5 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1}$ до $2,0 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1}$ має місце збільшення ширини спектра в 1,5 раза. При цьому рівень насичення також збільшується в 1,3 раза.

Проведено аналіз залежності ширини частотного спектра від різниці парціальних плазмових частот за умови сталості середнього значення плазмової частоти. З'ясовано, що максимальна ширина частотного спектру та рівень насичення спостерігаються, якщо різниця парціальних плазмових частот дорівнює нулю. У разі збільшення цієї різниці має місце незначне зменшення як ширини частотного спектра, так і рівня насичення.

У четвертому розділі «Формування електромагнітних сигналів у мультигармонічних ДСЛВЕ з гвинтовими електронними пучками» проведено дослідження динаміки мультигармонічних електромагнітних хвиль у двопотокових супергетеродинних лазерах на вільних електронах Н-убітронного типу з гвинтовими електронними пучками.

У першому підрозділі розглянута узагальнена теоретична модель секції модуляції та прикінцевої секції мультигармонічного ДСЛВЕ Н-убітронного типу з гвинтовими електронними пучками, описаного в розділі 2. Зазначимо, що ці секції є подібними. Відрізняються вони як за призначенням, так і за граничними умовами. Так, секція модуляції призначена для формування мультигармонічної хвилі просторового заряду, тобто в ній відбувається передавання енергії від електромагнітної хвилі до ХПЗ. У прикінцевій секції мають місце інші процеси: мультигармонічна хвиля просторового заряду створює мультигармонічну електромагнітну хвилю. Тобто передавання енергії у прикінцевій секції відбувається в зворотному напрямку порівняно із секцією модуляції. З точки зору математичної постановки ці моделі відрізняються граничними умовами. У секції модуляції на вхід подається електромагнітний сигнал, а хвиля просторового заряду відсутня (амплітуди всіх гармонік дорівнюють нулю). У прикінцевій секції, навпаки, на вході

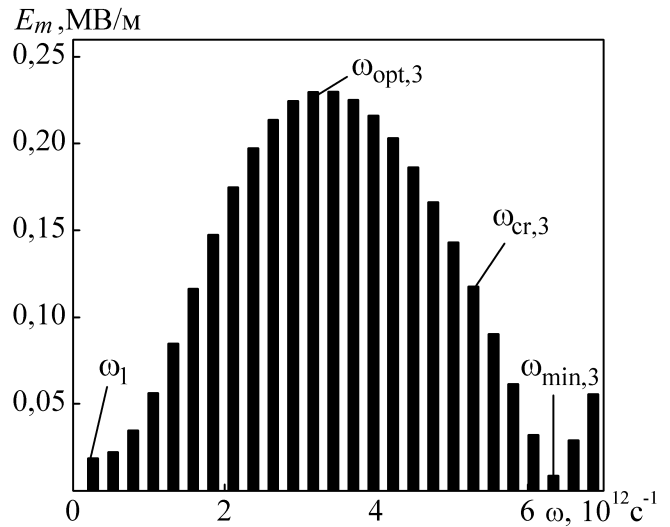


Рисунок 3 – Залежність амплітуд гармонік E_m мультигармонічної ХПЗ від частоти ω для кута вльоту $\alpha_3 = 20^\circ$. Параметри, за яких проведені обчислення, такі самі, як і для рисунка 2

електромагнітна хвиля відсутня, подається мультигармонічна хвиля просторового заряду, що складається з багатьох гармонік. На відміну від пролітної секції, де мають місце лише множинні резонансні взаємодії між гармоніками поздовжньої хвилі просторового заряду, в секції модуляції та прикінцевій секції відбуваються також множинні резонансні взаємодії між гармоніками хвилі сигналу, ХПЗ та мультигармонічним полем накачування. Також відбуваються множинні взаємодії між гармоніками електромагнітного сигналу. На вищеописані резонанси накладаються резонансні взаємодії, пов'язані з обертальним рухом електронів у поздовжньому магнітному полі.

У *другому* підрозділі за допомогою модифікованого методу усереднених характеристик одержана кубічна система диференціальних рівнянь, що описує динаміку m -х амплітуд гармонік хвиль сигналу та ХПЗ у двопотоковому супергетеродинному ЛВЕ із гвинтовим пучком і Н-убітронним накачуванням. Сутність модифікації полягає в тому, що швидкості електронів q го електронного пучка подаємо як незбурену складову руху вздовж гвинтової лінії у фокусувальному магнітному полі та збурену складову руху під дією всіх інших полів: $v_{qx} = \bar{v}_{q\perp} \cos \bar{p}_{q0} + \tilde{v}_{qx}$, $v_{qy} = \bar{v}_{q\perp} \sin \bar{p}_{q0} + \tilde{v}_{qy}$. Завдяки цьому достатньо легко одержуємо систему вихідних рівнянь у стандартному вигляді для застосування методу усереднених характеристик. Одержану систему кубічно-нелінійних рівнянь аналізуємо чисельно. Ця система рівнянь описує нелінійні процеси в ДСЛВЕ клістронного типу.

У *третьому* підрозділі проаналізовано динаміку хвиль в односекційному ДСЛВЕ із гвинтовими релятивістськими пучками в слабосигнальному наближенні. У цьому разі секція модуляції I, пролітна секція II та прикінцева секція III (рисунок 1) суміщаються. На рисунку 4 наведені залежності амплітуд напруженості електричного поля гармонік електромагнітної хвилі сигналу від поздовжньої координати для випадку монохроматичного вхідного сигналу як для прямолінійного, так і для гвинтового електронного пучка. З рисунка 4 випливає, що темпи підсилення гармонік напруженості електричного поля для гвинтового електронного пучка (криві 2) вищі, ніж для прямолінійного електронного пучка (криві 1). Також із цього рисунка випливає, що завдяки множинним трихвильовим параметричним резонансам збуджуються вищі гармоніки, а потім підсилюються завдяки додатковому механізму – двопотоковій нестійкості. У результаті таких процесів формуються мультигармонічні електромагнітні хвилі.

На рисунку 4 також показано залежності амплітуд напруженості електричного поля гармонік електромагнітної хвилі сигналу від поздовжньої координати для випадку мультигармонічного вхідного сигналу. Наявність вхідного мультигармонічного сигналу, що складається з незначної кількості гармонік (три гармоніки), призводить до істотного зниження довжин насичення (вдвічі й більше) як для прямолінійного, так і для гвинтового релятивістського електронного пучка. Цей вплив на довжини насичення мультигармонічного вхідного сигналу пояснюється такими обставинами. По-перше, завдяки використанню мультигармонічного вхідного сигналу відбувається більш швидке збудження вищих

гармонік ХПЗ, які фактично визначають формування вихідної мультигармонічної електромагнітної хвилі. По-друге, збудження вищих гармонік ХПЗ відбувається на більших частотах, що характеризуються більш високими інкрементами зростання. Таким чином, використання мультигармонічних вхідних сигналів призводить до більш інтенсивного формування потужної електромагнітної хвилі з широким частотним спектром.

У четвертому підрозділі досліджено динаміку формування мультигармонічної електромагнітної хвилі у ДСЛВЕ клістронного типу з гвинтовим РЕП у кубічному нелінійному наближенні. Саме завдяки використанню клістронної моделі, а саме, просторовому рознесенню процесів модуляції електронного пучка, формуванню хвилі просторового заряду з широким частотним спектром, перетворенню енергії поздовжньої мультигармонічної ХПЗ на енергію поперечних електромагнітних хвиль, вдається одержати на виході з такого ДСЛВЕ потужну електромагнітну хвилю, що складається з великої кількості сумірних за амплітудами гармонік.

Розглянемо ДСЛВЕ з такими параметрами: середнє значення релятивістського фактора двопотокового гвинтового РЕП $\gamma_0 = 5,0$, різниця релятивістських факторів парціальних пучків $\Delta\gamma = 0,2$, плазмова частота парціальних пучків $\omega_p = 1,0 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1}$, швидкості електронів у пучку спрямовані під кутом $\alpha = 15^\circ$ відносно осі системи, частота першої гармоніки електромагнітного сигналу $\omega_{1,1} = 7 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1}$, період ондулятора $\lambda_{2,1} = 4,5 \text{ см}$.

Відомо, що всі гармоніки хвилі просторового заряду, частота яких менша за критичну частоту двопотокової нестійкості ($\omega_{cr} = 2,5 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1}$ для моделі, що розглядається), будуть підсилюватися внаслідок двопотокової нестійкості. Для досліджуваної моделі з гвинтовим електронним пучком до цієї області підсилення

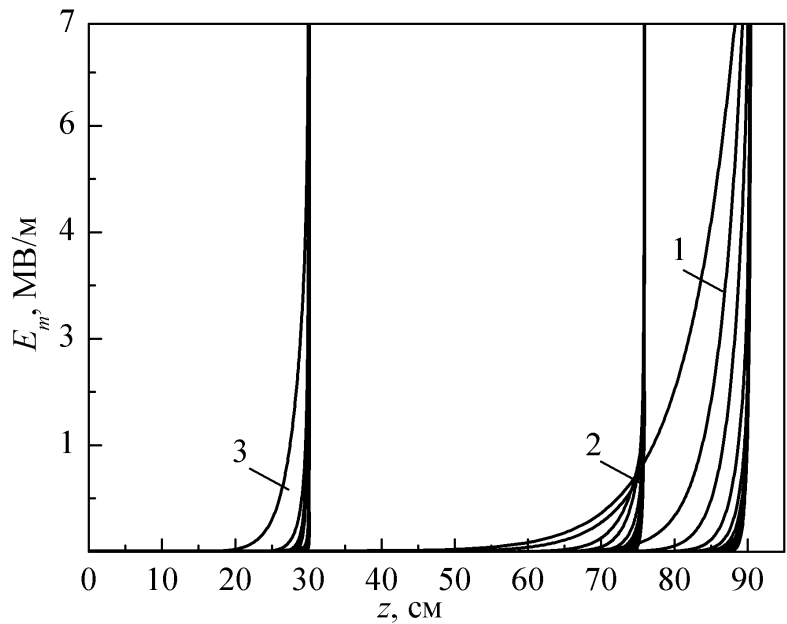


Рисунок 4 – Залежності амплітуд напруженості електричного поля гармонік електромагнітної хвилі сигналу від поздовжньої координати z . Крива 1 відповідає куту вльоту електронного пучка $\alpha = 0^\circ$, вхідний сигнал монохроматичний; крива 2 відповідає куту вльоту електронного пучка $\alpha = 30^\circ$, вхідний сигнал монохроматичний; крива 3 відповідає куту вльоту електронного пучка $\alpha = 30^\circ$, вхідний сигнал складається з трьох гармонік

потрапляє $\omega_{cr} / \omega_{1,1} \approx 35$ гармонік. Причому частина з них, частоти яких менші за оптимальну частоту двопотокової нестійкості ($\omega_{opt} = 1,5 \cdot 10^{13} \text{ c}^{-1}$), зі збільшенням частоти буде мати більші інкременти зростання й утворюватиме аномальний спектр, в якому більш високочастотні гармоніки ХПЗ будуть мати більшу амплітуду. В область аномального спектра в цьому випадку потрапляє $\omega_{opt} / \omega_{1,1} \approx 21$ гармоніка.

Для аналізу динаміки електромагнітних хвиль використовуємо систему рівнянь, одержану в підрозділі 2. У секції модуляції внаслідок трихвильового параметричного резонансу між електромагнітним сигналом та Н-убітронним полем модулятора у двопотоковому електронному пучку збуджується хвиля просторового заряду. Ця ХПЗ далі підсилюється завдяки ефекту двопотокової нестійкості в пролітній секції. У результаті на її виході одержуємо мультигармонічну ХПЗ, спектр якої подано на рисунку 5. Як бачимо, на виході з пролітної секції формується ХПЗ з аномальним спектром, в якому максимальною є вже не перша гармоніка, а десята.

Необхідно зазначити, що на виході з пролітної секції хвиля просторового заряду з необхідним спектром ще остаточно не сформована. Її формування триває й у прикінцевій секції. Одночасно з цим у прикінцевій секції відбувається збудження мультигармонічної електромагнітної хвилі завдяки множинним трихвильовим параметричним резонансам між мультигармонічною ХПЗ, мультигармонічним Н-убітронним полем накачування та електромагнітною хвилею сигналу. Параметри гармонік мультигармонічного магнітного поля накачування вибираємо таким чином, щоб в прикінцевій секції сформувавши потужну мультигармонічну електромагнітну хвилю. Спектр електромагнітної хвилі на виході з прикінцевої секції поданий на рисунку 6.

Як впливає з рисунка 6, на виході мультигармонічного двопотокового супергетеродинного ЛВЕ клістронного типу з гвинтовим електронним пучком ми

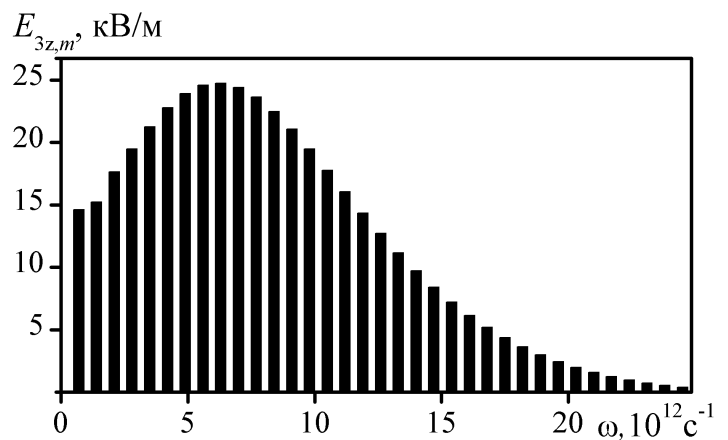


Рисунок 5 – Спектр ХПЗ на виході з пролітної секції

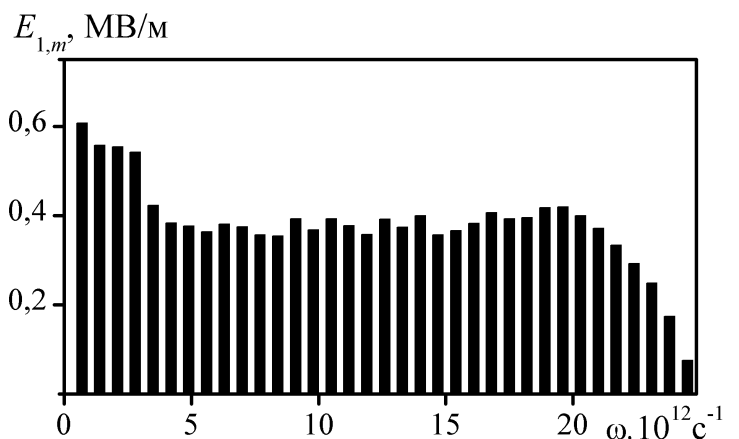


Рисунок 6 – Залежність модулів амплітуд гармонік електромагнітного сигналу від номера гармоніки на виході з ДСЛВЕ

одержуємо потужну мультигармонічну електромагнітну хвилю з широким частотним спектром, в якому майже тридцять гармонік мають практично однакову амплітуду. Використання гвинтових двопотокових РЕП і наявність пролітної секції в клістронній моделі дозволили істотно розширити спектр сформованої хвилі. Також необхідно зазначити, що інкременти зростання двопотокової нестійкості в гвинтових двопотокових РЕП істотно вищі, ніж у прямолінійних двопотокових РЕП. Це приводить до того, що мультигармонічні ДСЛВЕ із гвинтовими пучками мають менші поздовжні габарити. Так, у досліджуваній системі формування мультигармонічної електромагнітної хвилі відбувається в точці з координатою $z = 165$ см, а в аналогічній системі з прямолінійним двопотоковим РЕП це має місце в точці з координатою $z = 257$ см.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі проведено теоретичне дослідження динаміки електромагнітних хвиль у мультигармонічних двопотокових супергетеродинних лазерах на вільних електронах з гвинтовими релятивістськими електронними пучками. Найбільш важливі результати полягають у наступному.

1. Запропоновано використовувати в мультигармонічних двопотокових супергетеродинних ЛВЕ гвинтові електронні пучки. Показано, що завдяки цьому такі пристрої мають менші поздовжні габарити та здатні формувати потужні мультигармонічні електромагнітні хвилі з більш широким частотним спектром порівняно з двопотоковими супергетеродинними ЛВЕ, які використовують прямолінійні електронні пучки.

2. У кубічно-нелінійному наближенні одержано самоузгоджену систему диференціальних рівнянь для амплітуд гармонік хвиль мультигармонічних двопотокових супергетеродинних ЛВЕ Н-убітронного типу з гвинтовими РЕП. Виявлені та враховані трихвильові резонансні взаємодії різного типу, зокрема й пов'язані з обертальним рухом електронів у магнітному полі. Показано, що множинні взаємодії хвиль у таких системах є визначальними для формування електромагнітного сигналу з широким частотним спектром. Визначені умови, за яких має місце формування потужного електромагнітного сигналу з широким частотним спектром.

3. З'ясовано, що інкременти зростання хвиль просторового заряду у двопотокових супергетеродинних ЛВЕ з гвинтовими РЕП зростають за умови збільшення кута вльоту електронного пучка відносно фокусувального магнітного поля. Завдяки цьому в двопотоковому супергетеродинному ЛВЕ має місце збільшення темпів підсилення електромагнітної хвилі сигналу на $\sim 15\%$ при збільшенні кута вльоту електронного пучка відносно поздовжнього фокусувального магнітного поля з 0 до 30° .

4. Показано, що критична частота двопотокової нестійкості у гвинтових двопотокових РЕП зростає зі збільшенням цього кута вльоту. За умови збільшення кута вльоту пучка з 0 до 20° ширина спектра мультигармонічної хвилі в ДСЛВЕ з гвинтовим РЕП збільшується в $\sim 1,5$ раза.

6. Продемонстровано, що в разі використання мультигармонічного вхідного сигналу з вузьким частотним спектром (три гармоніки) у мультигармонічних ДСЛВЕ-підсилювачах з гвинтовими РЕП формування потужної мультигармонічної електромагнітної хвилі відбувається на довжинах, у два і більше разів менших порівняно із системами, на вхід яких подається монохроматичний вхідний сигнал.

7. Установлено, що в разі використання в приладі струмів ~ 6 кА, потужність мультигармонічних електромагнітних хвиль з широким частотним спектром, в якому гармоніки мають зіставні амплітуди, становить $\sim 0,5$ МВт у діапазоні довжин хвиль від 2,7 мм до 0,08 мм.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати

1. К теории формирования широкого мультигармонического спектра в двухпоточковом релятивистском электронном пучке / В. Кулиш, А. Лысенко, М. Ромбовский, В. Коваль, **Ю. Волк** // Науковий вісник Ужгородського університету. Серія «Фізика». – 2013. – No. 34. – P. 182–188.

2. Forming of space charge wave with broad frequency spectrum in helical relativistic two-stream electron beams / A. Lysenko, **I. Volk**, A. Serozhko, O. Rybalko // Chinese Physics Letters. – 2017. – Vol. 34, No. 7. – P. 75202.

3. Plural interactions of space charge wave harmonics during the development of two-stream instability / V. V. Kulish, A. V. Lysenko, M. Y. Rombovsky, V. V. Koval, **I. I. Volk** // Chinese Physics B. – 2015. – Vol. 24, No. 9. – P. 95201.

4. Lysenko A. Influence of two-stream relativistic electron beam parameters on the space-charge wave with broad frequency spectrum formation / A. Lysenko, **I. Volk** // Plasma Science and Technology. – 2018. – Vol. 20, No. 3. – P. 35002.

5. Forming of ultrashort electromagnetic clusters by two-stream superheterodyne free electron lasers / V. V. Kulish, A. V. Lysenko, M. Y. Rombovsky, V. V. Koval, **I. I. Volk** // Acta Physica Polonica A. – 2017. – Vol. 131, No. 1. – P. 213–221.

6. Lysenko A. V. Plural interactions of waves in multiharmonic two-stream superheterodyne free-electron lasers with helical electron beams / A. V. Lysenko, **I. I. Volk**, G. A. Oleksiienko // Journal of Nano- and Electronic Physics. – 2018. – Vol. 10, No. 2. – P. 2014-1–2014-9.

2. Наукові праці апробаційного характеру

7. К теории формирования широкого мультигармонического спектра в двухпоточковом релятивистском электронном пучке / В. В. Кулиш, А. В. Лысенко, М. Ю. Ромбовский, В. В. Коваль, **Ю. Ю. Волк** // Програма і тези доповідей міжнародної конференції молодих учених і аспірантів ІЕФ-2013 (Ужгород, 20–23 травня 2013) – Ужгород, 2013. – С. 193.

8. The Influence Of Parameters Of A Two-Speed Relativistic Electron Beam On The Spectral Shape Of The Growing Waves Of Space Charge / V. V. Kulish, A. V. Lysenko, M. Y. Rombovsky, V. V. Koval, **Y. Y. Volk** // Optics & High Technology

Material Science (SPO 2013) : 14th International Young Scientist Conference (Kyiv, 24–27 October 2013). – Kyiv, 2013. – P. 145.

9. Plural three-wave resonances of space charge wave harmonics in transit section of klystron-type two-stream FEL with helical electron beam / A. Lysenko, **I. Volk**, A. Serozhko, O. Rybalko // Proceedings of IEEE Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium (MRRS-2017), (Kyiv, 29–31 Aug. 2017) – Kyiv, 2017 – P.163-168.

10. Multiharmonic interactions of space charge wave harmonics during the development of two-stream instability / A. V. Lysenko, M. Y. Rombovsky, V. V. Koval, **I. I. Volk** // Праці X Міжнародної конференції «Електроніка та прикладна фізика», (Київ, 22–25 жовтня 2014). – Київ, 2014. – С. 140–141.

11. Lysenko A. V. Multiharmonic Spectrum Forming in Transit Section of Two-Stream Superheterodyne FEL with Non-Axial Beam Injection / A. V. Lysenko, **I. I. Volk** // Proceedings of International Young Scientists Conference Optics and High Technology Material Science SPO 2016 (Kyiv, 27–30 October 2016). – Kyiv, 2016. – P.139.

12. Lysenko A. V. Modelling of Space Charge Wave with Broad Frequency Spectrum Forming in Helical Relativistic Two-Stream Electron Beam / A. V. Lysenko, A. S. Serozhko, **I. I. Volk** // Proceedings of International Conference of Students and Young Scientists in Theoretical and Experimental Physics Heureka-2017 (Lviv, 16–18 May 2017). – Lviv, 2017. – P. H2

13. Lysenko A. V. Helical Two-Stream Relativistic Electron Beam Parameters Influence on Space Charge Wave with Broad Frequency Spectrum Forming / A. V. Lysenko, **I. I. Volk**. // Праці XIII Міжнародної конференції «Електроніка та прикладна фізика», (Київ, 24–27 жовтня 2017). – Київ, 2017. – С. 186–187.

14. Ultrashort electromagnetic clusters formation in two-stream superheterodyne free electron lasers / A. V. Lysenko, M. Y. Rombovsky, V. V. Koval, **I. I. Volk** // International Conference of young scientists and post-graduates IEP-2015: proceedings (Uzhgorod, 18–22 May 2015). – Uzhgorod, 2015. – P. 117.

15. Kulish V. Two-Stream Superheterodyne Free Electron Lasers as Formers of Ultrashort Electromagnetic Clusters / V. Kulish, A. Lysenko, **I. Volk** // Proceedings of 9th International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW-2016), (Kharkiv, 21–24 June 2016). – Kharkiv, 2016 – С-8 (3pp).

16. Ultrashort electromagnetic clusters formation by two-stream superheterodyne free electron lasers / V. V. Kulish, A. V. Lysenko, **I. I. Volk**, O. Rybalko. // Proceedings of 41st International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz), (Copenhagen, 25–30 Sept. 2016). – Copenhagen, 2016. – H4E.2 (2pp).

17. Множинні резонансні взаємодії в двопотоковому лазері на вільних електронах клістронного типу із гвинтовим електронним пучком / О. В. Лисенко, **Ю. Ю. Волк**, А. С. Серьожко, О. О. Рибалко // Proceedings of International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics UkrMiCo-2017. (Одеса, 11–15 вересня 2017). – Одеса, 2017. – P. 170–174.

18. Lysenko A. V. On Multiharmonic Signal Amplification in Two-Stream Superheterodyne FELs with Helical Electron Beams / A. V. Lysenko, **I. I. Volk** //

Proceedings of International Conference of Students and Young Scientists in Theoretical and Experimental Physics Heureka-2018. (Lviv, 15–17 May 2018). – Lviv, 2018. – P. H3.

19. Lysenko A. On Theory of Multiharmonic Two-Stream Superheterodyne FELs with Helical Electron Beams / A. Lyseko, **I. Volk**, O. Rybalko // Proceedings of 9th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS-2018). (Odessa, 4–7 September 2018). – Odessa, 2018. – P. 304–309.

20. Modification of the method of averaged characteristics for multiharmonic problems in high-current electronics devices / V. Kulish, A. Lysenko, G. Oleksiienko, **I. Volk**. // Proceedings of IEEE International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET-2016). (Lviv, 5–7 July 2016). – Lviv, 2016. – p. 377–380.

21. Lysenko A. V. Modified Scheme of Asymptotic Integration in Theory of Multiharmonic Devices of High-Current Electronics Using Helical Relativistic Electron Beams / A. V. Lysenko, **I. I. Volk**, G. A. Oleksiienko // Proceedings of 2018 IEEE 17th International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET*2018). (Kyiv, 2–5 July 2018). – Kyiv, 2018. – P. 310–313.

22. Lysenko A. V. Application of Modified Asymptotic Integration Scheme in Theory of Multiharmonic Two-Stream FELs with Helical Electron Beams / A. V. Lysenko, **I. I. Volk**, G. A. Oleksiienko // Proceedings of 2018 IEEE 17th International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET*2018). (Kyiv, 2–5 July 2018). – Kyiv, 2018 – P. 318–321.

3. Праці, які додатково відображають наукові результати

23. Multiple three-wave resonances in two-stream free-electron laser with a helical electron beam / A. Lysenko, **I. Volk**, A. Serozhko, O. Rybalko // Information and Telecommunication Sciences. – 2018. – No. 1. – P. 58–64.

АНОТАЦІЯ

Волк Ю. Ю. Мультигармонічні двопотокові супергетеродинні ЛВЕ з гвинтовими електронними пучками. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.01 – фізика приладів, елементів і систем. – Сумський державний університет, Суми, 2019.

Дисертаційна робота присвячена теоретичному дослідженню динаміки електромагнітних хвиль у мультигармонічних двопотокових супергетеродинних лазерах на вільних електронах Н-убітронного типу з гвинтовими електронними пучками з урахуванням множинних трихвильових параметричних взаємодій різного типу.

Запропоновано використовувати гвинтові електронні пучки у мультигармонічних двопотокових супергетеродинних лазерах на вільних електронах (ДСЛВЕ), призначених для одержання потужного електромагнітного сигналу з широким частотним спектром. З'ясовано, що такі пристрої мають менші поздовжні габарити та здатні формувати мультигармонічні електромагнітні хвилі з більш широким частотним спектром порівняно з ДСЛВЕ, які використовують

прямолинійні електронні пучки.

У кубічному нелінійному наближенні одержано самоузгоджену систему диференціальних рівнянь для амплітуд гармонік електромагнітних хвиль у мультигармонічних двопотокових супергетеродинних лазерах на вільних електронах Н-убітронного типу з гвинтовими релятивістськими електронними пучками (РЕП). Виявлені та враховані трихвильові резонансні взаємодії різного типу, зокрема й пов'язані з обертальним рухом електронів у фокусувальному магнітному полі. Показано, що множинні взаємодії хвиль у таких системах є визначальними для формування електромагнітного сигналу з широким частотним спектром.

З'ясовано, що завдяки використанню гвинтових двопотокових РЕП у ДСЛВЕ вдається збільшити інкременти зростання хвиль за умови збільшення кута вльоту електронного пучка відносно фокусувального магнітного поля. Показано, що у гвинтових двопотокових РЕП критична частота двопотокової нестійкості також зростає зі збільшенням кута вльоту. Це дозволяє збільшити ширину частотного спектра електромагнітних хвиль, що формується мультигармонічними ДСЛВЕ. Завдяки використанню гвинтових двопотокових РЕП у ДСЛВЕ вдається сформувану мультигармонічну електромагнітну хвилю з більш широким частотним спектром та на менших відстанях порівняно з ДСЛВЕ, що використовують прямолинійні РЕП.

Продемонстровано, що в разі використання мультигармонічного вхідного сигналу з вузьким частотним спектром у мультигармонічних ДСЛВЕ-підсилювачах з гвинтовими РЕП формування потужної мультигармонічної електромагнітної хвилі відбувається на довжинах, у два і більше разів менших порівняно із системами, на вхід яких подається монохроматичний вхідний сигнал.

Ключові слова: супергетеродинний лазер на вільних електронах, множинні трихвильові параметричні резонанси, двопотокова нестійкість, гвинтові релятивістські електронні пучки.

АННОТАЦІЯ

Волк Ю. Ю. Мультигармонические двухпоточковые супергетеродинные ЛСЭ с винтовыми электронными пучками. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – физика приборов, элементов и систем. – Сумский государственный университет, Сумы, 2019.

Диссертация посвящена теоретическому исследованию динамики электромагнитных волн в мультигармонических двухпоточковых супергетеродинных лазерах на свободных электронах Н-убитронного типа с винтовыми электронными пучками с учетом множественных трёхволновых параметрических взаимодействий разного типа.

Предложено использовать винтовые электронные пучки в мультигармонических двухпоточковых супергетеродинных лазерах на свободных электронах (ДСЛСЭ), предназначенных для получения мощного электромагнитного сигнала с широким частотным спектром. Установлено, что такие устройства имеют меньшие продольные габариты и способны формировать мультигармонические

электромагнитные волны с более широким частотным спектром по сравнению с ДСЛСЭ, использующими прямолинейные электронные пучки.

В кубическом нелинейном приближении получена самосогласованная система дифференциальных уравнений для амплитуд гармоник электромагнитных волн в мультигармонических двухпоточковых супергетеродинных лазерах на свободных электронах Н-убитронного типа с винтовыми релятивистскими электронными пучками (РЭП). Выявлены и учтены трёхволновые резонансные взаимодействия различного типа, в том числе и связанные с вращательным движением электронов в фокусирующем магнитном поле. Показано, что множественные взаимодействия волн в таких системах являются определяющими для формирования электромагнитного сигнала с широким частотным спектром.

Выяснено, что благодаря использованию винтовых двухпоточковых РЭП в ДСЛСЭ удастся увеличить инкременты нарастания волн при условии увеличения угла влета электронного пучка относительно фокусирующего магнитного поля. Показано, что в винтовых двухпоточковых РЭП критическая частота двухпоточковой неустойчивости также вырастает с увеличением угла влета. Это позволяет увеличить ширину частотного спектра электромагнитных волн, формирующегося мультигармоническими ДСЛСЭ. Благодаря использованию винтовых двухпоточковых РЭП в ДСЛСЭ удастся сформировать мультигармоническую электромагнитную волну с более широким частотным спектром и на меньших расстояниях по сравнению с ДСЛСЭ, использующими прямолинейные РЭП.

Продемонстрировано, что в случае использования мультигармонического входного сигнала с узким частотным спектром в мультигармонических ДСЛСЭ-усилителях с винтовыми РЭП формирование мощной мультигармонической электромагнитной волны происходит на длинах, в два и более раз меньших по сравнению с системами, на вход которых подается монохроматический входной сигнал.

Ключевые слова: супергетеродинный лазер на свободных электронах, множественные трёхволновые параметрические резонансы, двухпоточковая неустойчивость, винтовые релятивистские электронные пучки.

ABSTRACT

Volk I. I. Multiharmonic two-stream superheterodyne FELs with helical electron beams. – Manuscript.

Thesis submitted for the degree of a candidate of physical and mathematical sciences by specialty 01.04.01 – physics of devices, elements and systems. – Sumy State University, Sumy, 2019.

The thesis is devoted to the theoretical study of the electromagnetic waves dynamics in multiharmonic two-stream superheterodyne free-electron lasers of the H-ubitron type with helical electron beams, considering multiple three-wave parametric interactions of different types.

It has been proposed to use helical electron beams in multiharmonic two-stream superheterodyne free-electron lasers (TSFELs), which are designed to produce a powerful

electromagnetic signal with a wide frequency spectrum. It has been found that such devices have smaller longitudinal dimensions and are capable of forming multiharmonic electromagnetic waves with wider frequency spectrum compared to TSFELs that use straight electron beams.

A self-consistent system of differential equations has been obtained in the cubic nonlinear approximation for the harmonics amplitudes of electromagnetic waves in multiharmonic two-stream superheterodyne free-electron lasers of H-ubitron type with helical relativistic electron beams (REBs). Three-wave resonant interactions of various types, including those associated with the rotational motion of electrons in a focusing magnetic field, have been identified and considered. It has been shown that multiple interactions of waves in such systems are decisive for the formation of an electromagnetic signal with wide frequency spectrum.

It has been found that due to the use of two-stream helical REBs in TSFEL, it is possible to increase the wave growth rates under the condition of increasing the electron beam input angle relative to the focusing magnetic field. It has been also shown that in helical two-stream REBs, the critical frequency of two-stream instability also increases with an angle. This allows to increase the frequency spectrum width of electromagnetic waves formed by multiharmonic TSFEL. Using two-stream helical REB in TSFEL, it is possible to form a multiharmonic electromagnetic wave with wide frequency spectrum and at smaller distances compared to TSFELs that use straight REBs.

It has been demonstrated that in the case of multiharmonic input signal with a narrow frequency spectrum in multiharmonic TSFEL amplifiers with helical REB, the formation of powerful multiharmonic electromagnetic wave occurs at lengths two and more times smaller than the systems using monochromatic input signal.

Key words: superheterodyne free-electron laser, plural three-wave parametric resonances, two-stream instability, helical relativistic electron beam.

Підписано до друку 16.04.2019.
Формат 60×90/16. Ум. друк. арк. 1,1. Обл.-вид. арк. 0,9. Тираж 100 пр. Зам. № .

Видавець і виготовлювач
Сумський державний університет,
вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, 40007
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3062 від 17.12.2007.