

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

Олексієнко Галина Андріївна



УДК 533.9:621.375.7

**МУЛЬТИГАРМОНІЧНІ ВЗАЄМОДІЇ У ПЛАЗМОВО-ПУЧКОВИХ
СУПЕРГЕТЕРОДИННИХ ЛАЗЕРАХ НА ВІЛЬНИХ ЕЛЕКТРОНАХ
ІЗ ГВИНТОВИМИ ЕЛЕКТРОННИМИ ПУЧКАМИ**

01.04.01 – фізика приладів, елементів і систем

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Суми - 2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у 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 «27» січня 2017 р. о 12⁰⁰ на засіданні спеціалізованої вченої
ради Д 55.051.02 при Сумському державному університеті за адресою: 40007,
м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2, корпус ЕТ, ауд. 236,
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:
<http://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/46927>.

Автореферат розіслано «29» 11 2016 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



І. В. Чешко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Серед приладів релятивістської надвисокочастотної електроніки одними з найбільш перспективних із практичної та цікавих із теоретичної точок зору є лазери на вільних електронах (ЛВЕ). Це обумовлено тим, що ці прилади здатні генерувати, підсилювати потужне когерентне електромагнітне випромінювання в широкому діапазоні довжин хвиль від міліметрового до рентгенівського. Серед різних типів ЛВЕ необхідно виділити супергетеродинні лазери на вільних електронах (СЛВЕ), що характеризуються високими підсилювальними властивостями. Ці властивості пов'язані з тим, що СЛВЕ використовують додатковий механізм підсилення однієї з хвиль, які беруть участь у параметричному резонансі. Як додатковий механізм підсилення плазмово-пучкового супергетеродинного лазера на вільних електронах використовують плазмово-пучкову нестійкість. Завдяки додатковому механізму підсилення за помірних вимог до параметрів плазмово-пучкові СЛВЕ є більш компактними, мають більші вихідні потужності, значення коефіцієнта підсилення та інше порівняно з традиційними ЛВЕ.

Відомо, що використання гвинтових релятивістських електронних пучків (РЕП) у пристроях потужнострумової електроніки з поздовжнім магнітним полем у ряді випадків призводить до підвищення їх ефективності. Тому можна припустити, що використання гвинтових релятивістських електронних пучків у плазмово-пучкових СЛВЕ дозволить одержати більш високі значення інкрементів зростання хвиль та інших параметрів порівняно з плазмово-пучковими СЛВЕ, що використовують прямолінійні електронні пучки.

Відзначимо, що у плазмово-пучкових СЛВЕ використовують хвилі просторового заряду (ХПЗ), які експоненціально зростають завдяки плазмово-пучковій нестійкості й характеризуються лінійною дисперсійною залежністю. Це приводить до того, що для великої кількості гармонік ХПЗ виконуються умови трихвильового параметричного резонансу, тобто мають місце множинні резонансні взаємодії. Відомо, що мультигармонічні взаємодії в плазмово-пучкових СЛВЕ із прямолінійними електронними пучками істотно впливають на динаміку хвиль. Тому можна очікувати, що і в плазмово-пучкових СЛВЕ із гвинтовими електронними пучками множинні резонансні взаємодії також будуть мати істотний вплив на роботу пристрою. Таким чином, вивчення мультигармонічних процесів у плазмово-пучкових супергетеродинних лазерах на вільних електронах із гвинтовими електронними пучками є завданням важливим та актуальним.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі загальної та теоретичної фізики і кафедрі прикладної математики та моделювання складних систем Сумського державного університету. Матеріали дисертаційної роботи пов'язані з виконанням таких науково-дослідних робіт: «Електромагнітні явища в низькорозмірних планарних періодичних металодіелектричних системах міліметрового-інфрачервоного діапазонів хвиль» (№ 0112U001379, 2012–2014 рр.); «Множинні резонансні взаємодії у плазмово-пучкових супергетеродинних лазерах на вільних електронах» (№ 0114U003770, 2014–2016 рр.); «Електрофізичні властивості низьковимірних метаматеріальних та

металодіелектричних систем міліметрового-інфрачервоного діапазонів хвиль» (№ 0115U000690, 2015–2017 рр.). Дисертант брала участь як виконавець у проведенні наукових досліджень у рамках зазначених НДР.

Мета і завдання досліджень. Метою дисертаційної роботи є побудова мультигармонічної теорії плазмово-пучкових супергетеродинних лазерів на вільних електронах із гвинтовими електронними пучками, визначення режимів роботи, коли формується потужне електромагнітне випромінювання.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

– побудувати самоузгоджені кубічно-нелінійні теорії плазмово-пучкових СЛВЕ із гвинтовими електронними пучками доплертронного та Н-убітронного типів з урахуванням множинних параметричних резонансів між вищими гармоніками ХПЗ;

– визначити інкременти зростання, рівні та механізми насичення електромагнітних хвиль у плазмово-пучкових СЛВЕ із гвинтовими електронними пучками з урахуванням множинних взаємодій хвиль;

– дослідити різні типи параметричних взаємодій хвиль у плазмово-пучкових СЛВЕ з неосьовим вльотом РЕП і визначити найбільш ефективні режими роботи приладу;

– провести модифікацію методу усереднених характеристик для розв'язання мультигармонічних задач у пристроях, що використовують гвинтові РЕП.

Об'єкт дослідження – процеси вимушеного випромінювання гвинтовими релятивістськими електронними пучками у лазерах на вільних електронах.

Предмет дослідження – динаміка електромагнітних хвиль у плазмово-пучкових супергетеродинних лазерах на вільних електронах із гвинтовими електронними пучками з урахуванням множинних параметрично-резонансних взаємодій, рівні та механізми насичення хвиль.

Методи дослідження. Як базовий метод теоретичного аналізу мультигармонічних взаємодій у досліджуваних супергетеродинних лазерах на вільних електронах використовувався метод усереднених характеристик. У роботі застосовувався квазігідродинамічний підхід для аналізу процесів у плазмово-пучкових системах. Також використовувалися метод повільно змінних амплітуд та стандартні чисельні та чисельно-аналітичні методи.

Наукова новизна одержаних результатів

1. Уперше показано, що в плазмово-пучкових супергетеродинних лазерах на вільних електронах як доплертронного, так і Н-убітронного типів має місце істотне збільшення коефіцієнтів підсилення електромагнітної хвилі сигналу за умови збільшення кута вльоту електронного пучка відносно поздовжнього фокусуємого магнітного поля. Установлено, що цей ефект має релятивістський характер та пов'язаний зі зміною поздовжньої кінетичної енергії електронів.
2. Уперше одержана система диференціальних рівнянь для амплітуд гармонік електромагнітних хвиль плазмово-пучкових супергетеродинних лазерів на вільних електронах із гвинтовими РЕП як доплертронного, так і Н-убітронного типів з урахуванням мультигармонічних взаємодій у кубічно-нелінійному наближенні. З'ясовано, що множинні взаємодії гармонік хвилі просторового

заряду призводять до зменшення рівня насичення основної гармоніки хвилі сигналу у два та більше разів.

3. Уперше для плазмово-пучкового супергетеродинного лазера на вільних електронах доплертронного типу з гвинтовим електронним пучком визначено режим роботи з найбільш високим рівнем насичення високочастотного електромагнітного сигналу, що перевищує рівні насичення в інших режимах роботи у два та більше разів. Установлено, що насичення в досліджуваному СЛВЕ відбувається за рахунок захоплення електронів пучка плазмовими хвилями.
4. Уперше для плазмово-пучкового супергетеродинного лазера на вільних електронах Н-убітронного типу із гвинтовим електронним пучком з'ясовано, що режим роботи, в якому використовується швидка циклотронна електромагнітна хвиля, характеризується найбільшим рівнем насичення хвилі сигналу. Для цього режиму роботи визначено оптимальний кут вльоту електронного пучка відносно поздовжнього магнітного поля, коли потужність електромагнітного сигналу стає максимальною.

Практичне значення одержаних результатів. Практичне значення проведених у дисертаційній роботі досліджень полягає у визначенні оптимальних режимів роботи плазмово-пучкових СЛВЕ із гвинтовими РЕП. Побудовані самоузгоджені кубічно-нелінійні теорії плазмово-пучкових СЛВЕ з доплертронною і Н-убітронною накачками при неосьовому вльоті електронного пучка дозволяють визначити оптимальні умови, коли підсилення електромагнітної хвилі сигналу відбувається з максимальним значенням ККД. Теоретично обґрунтована можливість використання плазмово-пучкових СЛВЕ із гвинтовими РЕП як потужних джерел електромагнітного випромінювання у міліметровому діапазоні довжин хвиль. Розроблені теорії можуть використовуватися для аналізу роботи інших пристроїв плазмової релятивістської електроніки, що використовують гвинтові релятивістські електронні пучки.

Особистий внесок здобувача полягає у безпосередній участі у поставці завдань, модифікації методів розв'язку, розробленні комп'ютерних програм, проведенні розрахунків, обговоренні одержаних результатів і написанні статей. Основні результати, що складають зміст дисертації, одержані особисто здобувачем. У роботах [3, 6, 13] дисертант разом із науковим керівником О. В. Лисенком провела модернізацію методу усереднених характеристик. У роботах [1–2, 8, 10, 14] автором дисертації була побудована квадратична теорія плазмово-пучкових СЛВЕ доплертронного і Н-убітронного типів із неосьовим вльотом електронного пучка, а також проведене комп'ютерне моделювання взаємодії хвиль у цих приладах. Здобувач у роботах [4–5, 11–12] брала участь у побудові кубічно-нелінійної теорії плазмово-пучкового СЛВЕ із доплертронною накачкою і гвинтовим РЕП, розробила комп'ютерну програму та провела комп'ютерне моделювання фізичних процесів у цьому приладі з урахуванням множинних параметричних взаємодій хвиль. У роботах [6–7, 9] автор дисертаційної роботи брала участь у побудові кубічно-нелінійної теорії плазмово-пучкового СЛВЕ Н-убітронного типу при неосьовому

вльоті РЕП, розробила комп'ютерну програму та провела комп'ютерне моделювання взаємодії хвиль у досліджуваній системі.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи оприлюднені та обговорені на таких симпозиумах і конференціях: XV і XVI International Young Scientists Conference Optics and High Technology Material Science (Київ, 2014–2015 pp.); X і XI International Conference "Electronics and Applied Physics" (Київ, 2014–2015 pp.); Міжнародній конференції молодих учених і аспірантів (Ужгород, 2015 p.); 17-му Міжнародному симпозиумі «Методи дискретних особливостей у завданнях математичної фізики» (Харків – Суми, 2015 p.); 24-й Міжнародній кримській конференції «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (Севастополь, 2014 p.).

Публікації. Результати дисертаційної роботи опубліковані у 14 наукових працях: 4 статті у періодичних фахових наукових виданнях України [3, 5–7], 3 статті у спеціалізованих іноземних журналах [1–2, 4], 4 статті у матеріалах конференцій [10–11, 13–14], зокрема з них 6 статей [1–3, 5–6, 14] індексується наукометричною базою даних Scopus, 3 тези доповідей у збірниках тез конференцій [8–9, 12].

Структура та обсяг дисертаційної роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, загальних висновків та списку використаних джерел. Обсяг дисертації становить 140 сторінок, з яких 112 – основний текст, 24 рисунки та 2 таблиці, зокрема 1 рисунок і 1 таблиця на 1 окремому аркуші. Список використаних джерел містить 165 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, подані інформація про особистий внесок здобувача, апробація результатів та структура роботи.

У **першому розділі** «Параметрично-резонансні взаємодії у плазмово-пучкових системах із гвинтовими електронними пучками (літературний огляд)» проведений огляд літературних джерел із використання гвинтових релятивістських електронних пучків у плазмово-пучкових системах.

З'ясовано, що лазери на вільних електронах, які базуються на ефекті супергетеродинного підсилення, характеризуються порівняно з еквівалентними параметричними ЛВЕ більшими коефіцієнтами підсилення, меншими габаритами та відносно невеликими амплітудами полів накачок. З огляду літератури з'ясовано, що до робіт автора дослідженими були лише плазмово-пучкові супергетеродинні лазери на вільних електронах із прямолінійними РЕП. Також аналіз літератури показав, що гвинтові електронні пучки широко використовуються у техніці лазерів на вільних електронах для одержання потужного електромагнітного випромінювання. У таких пучках можуть виникати такі ефекти, як циклотронний резонанс, аномальний і нормальний ефекти Допплера, що можуть привести до збільшення ефективності приладу порівняно з приладами, що використовують прямолінійні електронні пучки.

Таким чином, виникає необхідність у проведенні аналізу динаміки хвиль у плазмово-пучкових СЛВЕ із гвинтовими релятивістськими електронними пучками.

З огляду літератури було встановлено, що використання нестійкостей, які характеризуються лінійними дисперсійними залежностями (плазмово-пучкова, двопотокова та ін.), приводить до появи мультигармонічних взаємодій між гармоніками хвиль. З'ясовано, що в системах із прямолінійними електронними пучками такі взаємодії значно впливають на динаміку хвиль. Тому необхідно провести аналіз таких процесів у плазмово-пучкових супергетеродинних ЛВЕ із гвинтовими електронними пучками.

Також було проведено аналіз чисельних та чисельно-аналітичних методів, що використовуються в потужнострумівій електроніці. З'ясовано, що для проведення нелінійного аналізу мультигармонічних процесів у плазмово-пучкових супергетеродинних ЛВЕ, що використовують гвинтові релятивістські електронні пучки, найбільш ефективним є метод усереднених характеристик. Однак цей метод необхідно адаптувати для врахування особливостей динаміки гвинтових електронних пучків у плазмово-пучкових системах.

У **другому розділі** «Особливості застосування методу усереднених характеристик у плазмово-пучкових супергетеродинних лазерах на вільних електронах із гвинтовими електронними пучками» проведена модернізація методу усереднених характеристик, який є базовим у дисертаційній роботі. Сутність такої модернізації полягає в адаптації його до систем, які використовують гвинтові релятивістські електронні пучки. Також у цьому розділі розглянуто узагальнену схему плазмово-пучкового СЛВЕ, сформульовано основні припущення відносно моделей, що розглядаються у дисертаційній роботі.

У *першому* під-розділі наведені вихідні рівняння та проведено обґрунтування узагальненої схеми взаємодії хвиль у плазмово-пучковому супергетеродинному ЛВЕ із гвинтовим електронним пучком. Узагальнена схема взаємодії хвиль у такому пристрої подана на рис. 1. Фокусуюче поздовжнє магнітне поле з індукцією B_0 спрямоване вздовж осі системи Z . Через плазмове середовище 1, що характеризується ленгмюрівською частотою ω_p , проходить гвинтовий

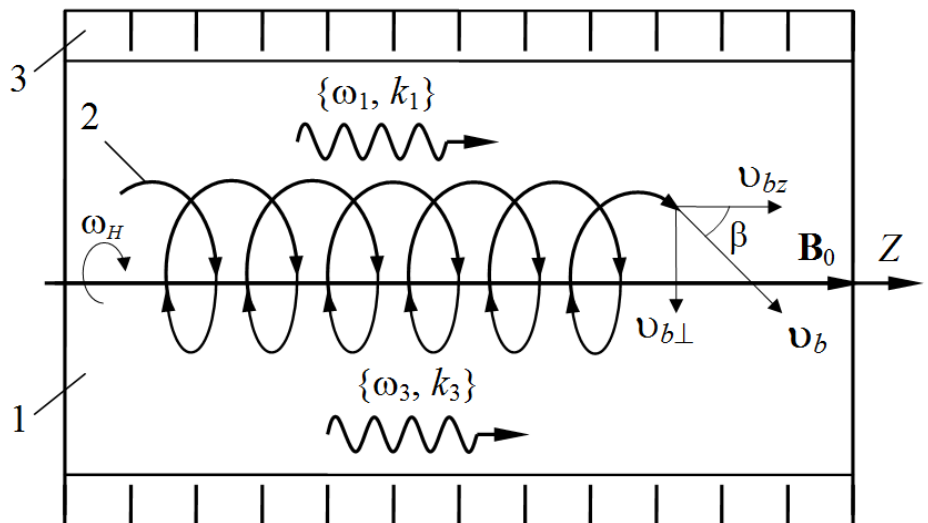


Рис. 1. Узагальнена схема взаємодії хвиль в плазмово-пучковому супергетеродинному ЛВЕ з гвинтовим релятивістським електронним пучком: 1 – плазма; 2 – гвинтовий РЕП; 3 – накачка

характеризується ленгмюрівською частотою ω_p , проходить гвинтовий

релятивістський електронний пучок 2 з ленгмюрівською частотою ω_b ($\omega_b \ll \omega_p$). Вектор швидкості \mathbf{v}_b електронів гвинтового пучка направлений під кутом β відносно осі Z . Циклотронна частота ω_H обертання електронів у повздовжньому магнітному полі набагато менша від плазмової частоти ($\omega_H \ll \omega_p$). Відповідно до типу накачки розрізняємо два типи плазмово-пучкових СЛВЕ, які досліджуються в дисертаційній роботі: доплертронні (накачка потужною низькочастотною електромагнітною хвилею) та Н-убітронні (накачка періодично-реверсивним магнітним полем). В узагальненій схемі (рис. 1) перша гармоніка системи накачки характеризується частотою $\omega_{2,1}$ і хвильовим числом $k_{2,1}$. На вхід плазмово-пучкової системи подається слабка високочастотна електромагнітна хвиля колової поляризації з частотою $\omega_{1,1}$ та хвильовим числом $k_{1,1}$. У досліджуваному пристрої має місце параметричний резонанс між хвилями сигналу та накачки, у результаті якого збуджується хвиля просторового заряду з частотою $\omega_{3,1}$ та хвильовим числом $k_{3,1}$. Умови трихвильових параметричних резонансів мають вигляд

$$\omega_{3,1} = \omega_{1,1} - \omega_{2,1}, \quad k_{3,1} = k_{1,1} + k_{2,1}. \quad (1)$$

За умови використання гвинтових РЕП у плазмово-пучкових СЛВЕ виникають додаткові множинні параметричні взаємодії хвиль. Це пов'язано з тим, що в системі мають місце коливання на циклотронній частоті. Умови таких резонансів мають вигляд:

$$\omega_{3,1} = (\omega_{1,1} \pm \omega_H/\bar{\gamma}_b) - (\omega_{2,1} \pm \omega_H/\bar{\gamma}_b), \quad \omega_{3,1} = (\omega_{1,1} \pm 2\omega_H/\bar{\gamma}_b) - (\omega_{2,1} \pm 2\omega_H/\bar{\gamma}_b), \dots \quad (2)$$

У плазмово-пучкових супергетеродинних лазерах на вільних електронах має місце ефект супергетеродинного підсилення. Ідея цього підсилення полягає у використанні додаткового механізму підсилення однієї з хвиль, що беруть участь у параметричному резонансі (1)–(2). Як додатковий механізм у досліджуваній системі використовується плазмово-пучкова нестійкість. Для того щоб одержати максимальне підсилення електромагнітної хвилі сигналу, параметри системи обираються такими, щоб інкремент плазмово-пучкової нестійкості мав максимальне значення. Завдяки тому, що інкремент такої нестійкості є істотно вищим за інкремент параметричної нестійкості, то лазери на вільних електронах які базуються на ефекті супергетеродинного підсилення, мають більші коефіцієнти підсилення порівняно зі звичайними параметричними ЛВЕ.

Однією з особливостей плазмово-пучкових СЛВЕ є те, що закон дисперсії для хвилі просторового заряду має квазілінійну дисперсію. Тому частоти $\omega_{3,m}$ і хвильові числа $k_{3,m}$ ХПЗ пропорційні номеру гармоніки m . Через це у плазмово-пучкових СЛВЕ між гармоніками ХПЗ виникають множинні параметричні взаємодії, умови яких мають вигляд:

$$k_{3,m_1} = k_{3,m_2} + k_{3,m_3}, \quad \omega_{3,m_1} = \omega_{3,m_2} + \omega_{3,m_3}, \quad \omega_{3,m_1} = (\omega_{3,m_2} \pm \omega_H/\bar{\gamma}_b) + (\omega_{3,m_3} \mp \omega_H/\bar{\gamma}_b), \\ \omega_{3,m_1} = (\omega_{3,m_2} \pm 2\omega_H/\bar{\gamma}_b) + (\omega_{3,m_3} \mp 2\omega_H/\bar{\gamma}_b), \dots \quad (3)$$

Множинні параметричні взаємодії (3) приводять до збудження вищих гармонік ХПЗ, які якісно впливають на динаміку хвиль системи. Таким чином, виникає математична задача врахування резонансної взаємодії хвиль різного типу (1)–(3), яка вирішується у третьому підрозділі.

У другому підрозділі проведено модифікацію методу усереднених характеристик для випадку гвинтових РЕП, які використовуються у плазмово-пучкових СЛВЕ. Релятивістський гвинтовий електронний пучок у плазмово-пучкових СЛВЕ рухається вздовж фокусуєчого магнітного поля під дією електричних і магнітних полів хвиль сигналу, накачки та ХПЗ (рис. 1). Для опису руху електронів пучка зручно перейти до циліндричної системи координат: $v_{bx} = v_{b\perp} \cos p_{b0}$, $v_{by} = v_{b\perp} \sin p_{b0}$, де $v_{b\perp}$ – поперечна швидкість електронів пучка; p_{b0} – фаза обертання електронів пучка у фокусуєчому магнітному полі. Вплив електромагнітних хвиль сигналу і накачки та електронної хвилі просторового заряду зазвичай описують як збурення поперечної швидкості $v_{b\perp} = \bar{v}_{b\perp} + \tilde{v}_{b\perp}$ та фази обертання $p_{b0} = \bar{p}_{b0} + \tilde{p}_{b0}$. У дисертаційній роботі запропоновано нову заміну, що має такий вигляд:

$$v_{bx} = \bar{v}_{b\perp} \cos \bar{p}_{b0} + \tilde{v}_{bx}, \quad v_{by} = \bar{v}_{b\perp} \sin \bar{p}_{b0} + \tilde{v}_{by}. \quad (4)$$

Тобто замість $\tilde{v}_{b\perp}$ і \tilde{p}_{b0} уведені \tilde{v}_{bx} та \tilde{v}_{by} . Така заміна дозволила значно спростити алгоритм асимптотичного інтегрування і достатньо легко одержати самоузгоджену кубічно-нелінійну систему диференціальних рівнянь для комплексних амплітуд взаємодіючих хвиль у плазмово-пучкових СЛВЕ з гвинтовими РЕП.

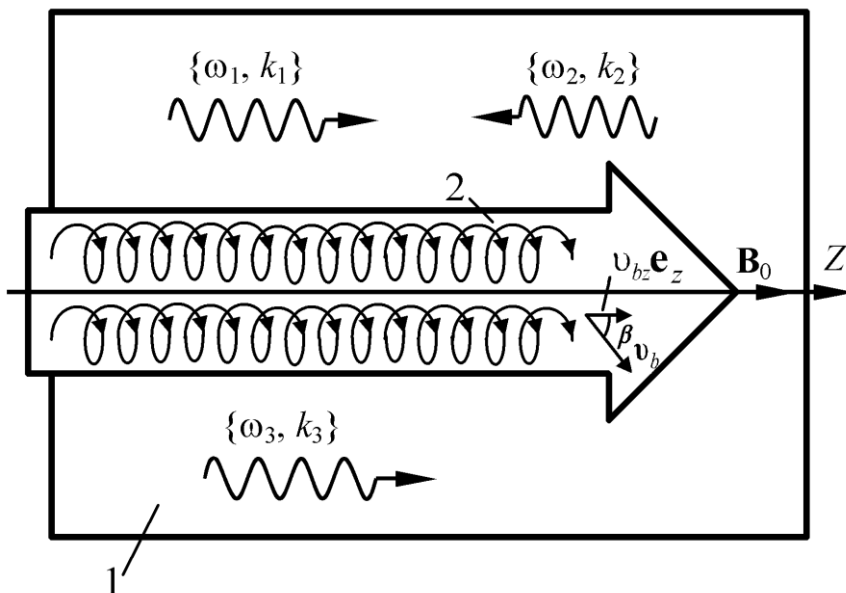


Рис. 2. Схема плазмово-пучкового СЛВЕ доплеретронного типу з гвинтовим РЕП: 1 – плазма; 2 – гвинтовий РЕП

У третьому підрозділі описані розроблені алгоритмічні схеми, що враховують параметрично-резонансні взаємодії хвиль різного типу (1)–(3) та добре адаптовані до чисельного моделювання динаміки хвиль у плазмово-пучкових СЛВЕ з гвинтовими електронними пучками.

У третьому розділі «Нелінійні взаємодії хвиль у плазмово-пучкових супергетеродинних лазерах на вільних електронах доплеретронного типу з гвинтовими електронними пучками» по-

будована мультигармонічна кубічно-нелінійна теорія плазмово-пучкового СЛВЕ з доплертронною накачкою і гвинтовим РЕП та проведено аналіз динаміки хвиль у такому пристрої.

У *першому* підрозділі розглянута модель плазмово-пучкового СЛВЕ з гвинтовим РЕП, схема якого подана на рис. 2. Загальна схема взаємодії хвиль у такому СЛВЕ розглянута в другому розділі. Позначення на рис. 2 такі самі, як і на рис. 1. Особливістю цього типу плазмово-пучкового СЛВЕ є те, що тут як накачка використовується потужна низькочастотна електромагнітна хвиля колової поляризації з частотою $\omega_{2,1}$ і хвильовим числом $k_{2,1}$. Хвиля накачки поширюється вздовж системи назустріч гвинтовому РЕП та задовольняє умові $\omega_2 \ll \omega_H$. Трихвильовий параметричний резонанс перших гармонік хвиль сигналу, накачки та ХПЗ у цій моделі відповідає умовам (1)–(2), а множинні резонанси умовам (3).

У *другому* підрозділі отримані рівняння, що описують нелінійну динаміку хвиль плазмово-пучкового СЛВЕ доплертронного типу з гвинтовим електронним пучком. Як вихідні використовуються квазігідродинамічне рівняння, рівняння неперервності й рівняння Максвелла. Для розв'язку задач руху та концентрації використовується модернізований метод усереднених характеристик, а польова задача розв'язується за допомогою методу повільно змінних амплітуд. У результаті в кубічному наближенні отримуємо систему диференціальних рівнянь для комплексних амплітуд перших гармонік напруженості електричного поля сигналу, накачки та амплітуд m -х гармонік напруженості електричного поля ХПЗ:

$$\begin{aligned}
 K_2 \frac{d^2 E_{1x}}{dt^2} + K_1 \frac{dE_{1x}}{dt} &= K_3 E_{3z} E_{2x} + F_{1x}(\mathbf{E}_1, \mathbf{E}_2, \mathbf{E}_3, \bar{v}_{\perp\alpha}, \bar{v}_{z\alpha}, \bar{n}_\alpha), \\
 M_2 \frac{d^2 E_{2x}}{dt^2} + M_1 \frac{dE_{2x}}{dt} &= M_3 E_{3z}^* E_{1x} + F_{2x}(\mathbf{E}_1, \mathbf{E}_2, \mathbf{E}_3, \bar{v}_{\perp\alpha}, \bar{v}_{z\alpha}, \bar{n}_\alpha), \\
 C_{2,m} \frac{d^2 E_{3z,m}}{dt^2} + C_{1,m} \frac{dE_{3z,m}}{dt} + D_{3m} E_{3z,m} &= C_{3,m} (E_{1x} E_{2x}^* + E_{1y} E_{2y}^*) + \\
 + C_4 \left\langle \int E_z \left(\int E_z dp_3 \right) dp_3 \right\rangle_{p_{3,m}} + C_5 \left\langle \left(\int E_z dp_3 \right)^2 \right\rangle_{p_{3,m}} &+ F_{3z,m}(\mathbf{E}_1, \mathbf{E}_2, \mathbf{E}_3, \bar{v}_{\perp\alpha}, \bar{v}_{z\alpha}, \bar{n}_\alpha).
 \end{aligned} \tag{5}$$

У *третьому* підрозділі були визначені режими трихвильової взаємодії хвиль сигналу, накачки і ХПЗ, а також вивчений вплив кута вльоту електронного пучка на динаміку хвиль у плазмово-пучковому СЛВЕ.

На рис. 3 подані дисперсійні криві хвиль сигналу (криві 1–2), накачки (крива 4) і ХПЗ (криві 3). Точці O відповідають частота і хвильове число ХПЗ, коли інкремент плазмово-пучкової нестійкості має максимальне значення. Крива 5 – результат паралельного перенесення кривої 4 з точки O' у точку O . Точки A, B, C, D на рис. 3 характеризують частоти та хвильові числа хвилі сигналу, які можуть брати участь у параметричному резонансі (1)–(2). Таким чином, у досліджуваній системі мають місце чотири різних режими роботи, які згідно з рис. 3 позначено як $A, B, C,$

D. Зазначимо, що такі режими мають місце у плазмово-пучкових СЛВЕ доплертронного типу як з прямолінійними, так і з гвинтовими РЕП.

Також було з'ясовано, що для плазмово-пучкового СЛВЕ із гвинтовим РЕП інкремент плазмово-пучкової нестійкості збільшується зі збільшенням кута вльоту β електронного пучка відносно фокусуєчого магнітного поля. Наближена залежність інкременту плазмово-пучкової нестійкості від кута β має вигляд

$$\delta\omega(\beta) \approx \sqrt{3}(\omega_b^2 \omega_p / 16\gamma_b)^{1/3} \cdot (1 - v_b^2 \cos^2 \beta / c^2)^{1/3}. \quad (6)$$

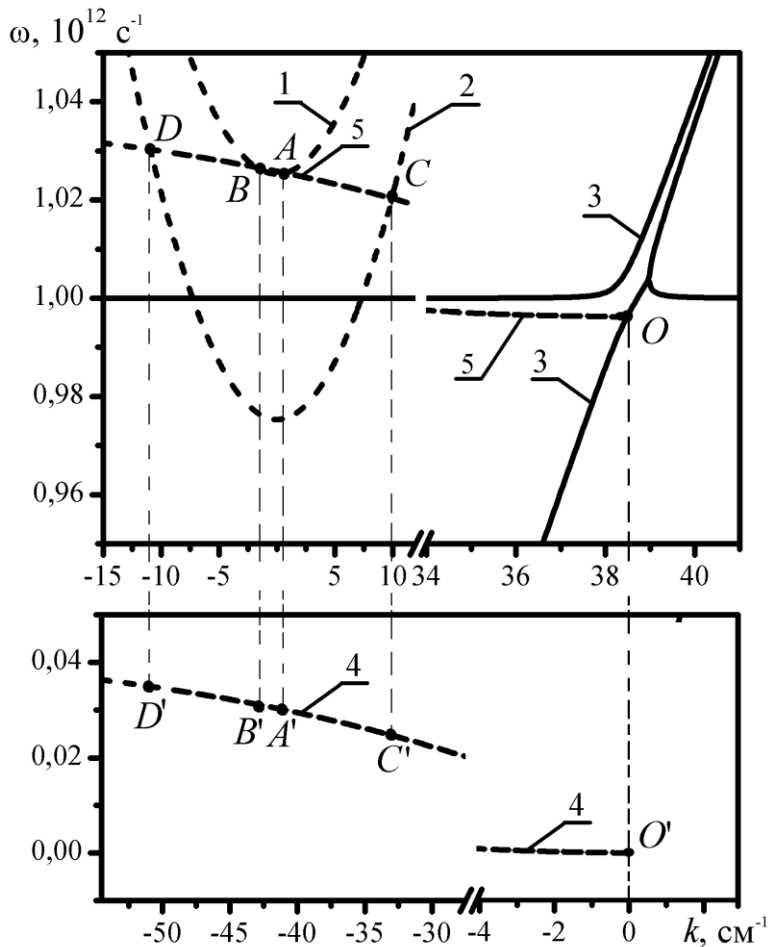


Рис. 3. Дисперсійні криві хвиль сигналу (1, 2), ХПЗ (3) та накачки (4, 5)

поля $E_{1,1}$ сигналу від нормованого часу $\tau = t \cdot \delta\omega(0^\circ)$ для кута вльоту $\beta = 30^\circ$. Кривим A, B, C, D відповідають режими роботи, які описані в третьому підрозділі (рис. 3).

Із рис. 4 випливає, що найбільшим рівнем насичення електромагнітної хвилі сигналу характеризується режим взаємодії D, хоча при цьому найбільші темпи підсилення на початковому етапі взаємодії має режим C. Різну динаміку амплітуди поля сигналу режимів A, B, C, D визначає інкремент трихвильової параметричної нестійкості. Зазначимо, що на рис. 4 для всіх режимів роботи інкремент плазмово-пучкової нестійкості є однаковим.

Ефект збільшення інкременту $\delta\omega$ зі збільшенням кута β пов'язаний зі зміною поздовжньої кінетичної енергії електронів пучка, яка залежить від кута β . Зазначимо, що цей ефект має релятивістський характер. З'ясовано, що за умови збільшення кута β вльоту пучка з 0° до 30° інкремент зростання збільшується більше ніж на 20%.

У четвертому підрозділі, використовуючи отриману систему диференціальних рівнянь (5), чисельно аналізуються рівні та механізми насичення, а також вплив мультигармонічних взаємодій вищих гармонік хвилі просторового заряду на динаміку хвиль сигналу.

На рис. 4 подані залежності амплітуд напруженості електричного

На рис. 5 подані залежності амплітуди першої гармоніки напруженості електричного поля хвилі сигналу від нормованого часу для режиму взаємодії D (рис. 3) за умови кута вльоту $\beta = 30^\circ$. Довжина хвилі для цього режиму $\lambda_1 \approx 1,8$ мм. Для розрахунків кривої 1 враховувалися лише перші гармоніки взаємодіючих хвиль, а для кривої 2 враховувалися перші 10 гармонік ХПЗ. Із рис. 5 випливає, що мультигармонічні взаємодії вищих гармонік хвилі просторового заряду істотно впливають на динаміку хвилі сигналу, а саме знижують рівень насичення більше ніж удвічі. Таким чином, для побудови кубічно-нелінійної теорії плазмово-пучкового супергетеродинного ЛВЕ доплертронного типу з гвинтовим РЕП необхідно обов'язково враховувати множинні резонанси вищих гармонік ХПЗ.

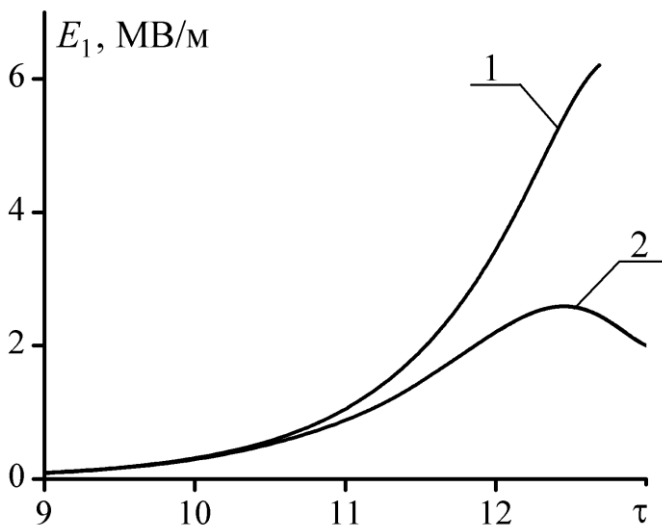


Рис. 5. Залежності амплітуд перших гармонік напруженості електричного поля хвилі сигналу від нормованого часу: 1 – без урахування множинних резонансів ХПЗ; 2 – з урахуванням множинних резонансів ХПЗ

потужністю десятки мегават у міліметровому діапазоні довжин хвиль.

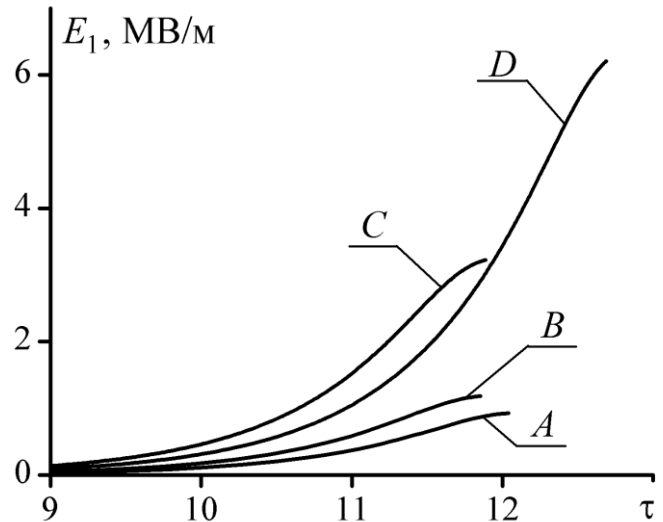


Рис. 4. Залежності амплітуд перших гармонік напруженості електричного поля хвилі сигналу від нормованого часу для режимів A, B, C, D

Аналізуючи рівні насичення хвилі сигналу, для режиму взаємодії D отримуємо, що вихідна потужність електромагнітної хвилі такого плазмово-пучкового СЛВЕ дорівнює $P = 16$ МВт, а електронний ККД $\sim 30\%$. Зауважимо, що параметри пучка бралися достатньо помірні для таких плазмово-пучкових систем (концентрація електронів пучка $1,3 \cdot 10^9$ см $^{-3}$, релятивістський фактор пучка 2, сила струму 100 А). Таким чином, плазмово-пучкові супергетеродинні лазери на вільних електронах із доплертронною накачкою і гвинтовими РЕП здатні формувати електромагнітну хвилю

Також у цьому підрозділі були досліджені механізми насичення у плазмово-пучковому СЛВЕ з гвинтовим пучком доплертронного типу. На рис. 6 подані залежності амплітуд першої гармоніки концентрації пучка, нормованої на постійну складову концентрації плазми $n_{p3,1n} = n_{p3,1} / n_{p0}$ (рис. 6, крива 1, вісь абсцис ліворуч), і першої гармоніки концентрації електронів пучка, нормованої на постійну складову концентрації електронів пучка $n_{b3,1n} = n_{b3,1} / n_{b0}$ (рис. 6, крива 2, вісь абсцис праворуч), від нормованого часу.

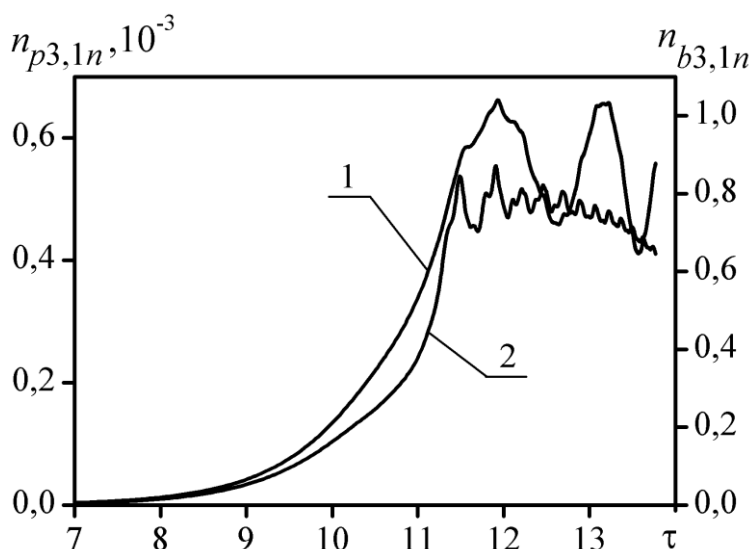


Рис. 6. Залежність амплітуд перших гармонік концентрації електронів плазми (крива 1, вісь абсцис ліворуч) і пучка (крива 2, вісь абсцис праворуч) від нормованого часу

На початковому етапі взаємодії спостерігається експоненціальне зростання обох величин, а потім відбувається їх стабілізація (рис. 6), яка обумовлена захопленням електронів пучка плазмовою хвилею. Електрони пучка формуються в згустки і коливаються в межах квазіпотенціальної ями плазмової хвилі. Характерною поведінкою для такого механізму насичення є те, що коливання концентрації пучка відбувається в декілька разів частіше, ніж коливання плазмової хвилі. Таким чином, захоплення електронів пучка плазмовою хвилею є основним механізмом насичення в плазмово-пучковому СЛВЕ із гвинтовими релятивістськими електронними пучками.

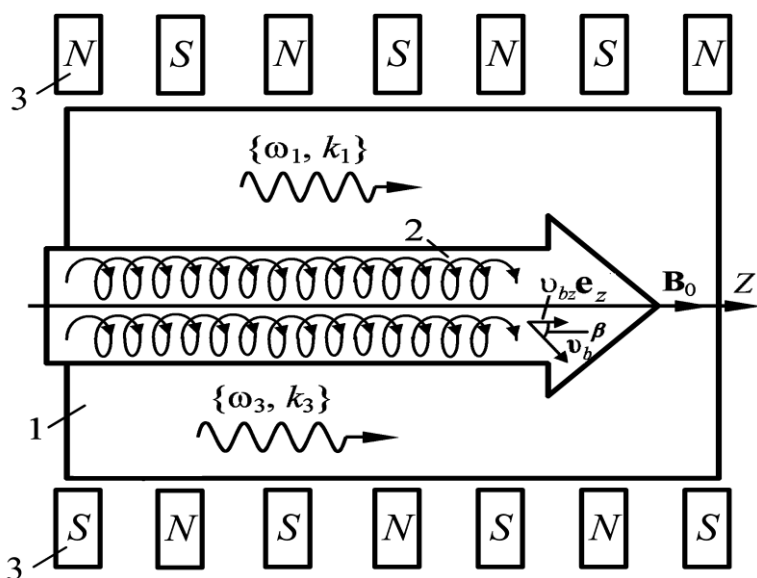


Рис. 7. Схема *N*-убітронного плазмово-пучкового СЛВЕ з гвинтовим РЕП: 1 – плазма; 2 – гвинтовий РЕП; 3 – накачка

У четвертому розділі «Нелінійні взаємодії хвиль у плазмово-пучкових *N*-убітронних супергетеродинних лазерах на вільних електронах із гвинтовими електронними пучками» побудована самоузгоджена кубічно-нелінійна теорія плазмово-пучкових супергетеродинних лазерів на вільних електронах з *N*-убітронною накачкою і гвинтовим релятивістським електронним пучком.

У першому підрозділі розглянута модель плазмово-пучкового супергетеродин-

ного ЛВЕ Н-убітронного типу із гвинтовим РЕП. Схема пристрою подана на рис. 7. Такий плазмово-пучковий СЛВЕ відрізняється від доплертронного типом накачки. Як накачка в Н-убітронній моделі використовується періодично-реверсивне магнітне поле (позиція 3 на рис. 7) з періодом ондуляції $\Lambda = 2\pi/k_{2,1}$. Умови резонансу в цій моделі подібні до умов (1)–(3), в яких частоту $\omega_{2,1}$ потрібно прийняти такою, що дорівнює нулю.

У другому підрозділі на базі методу усереднених характеристик, який описаний у другому розділі, отримана кубічна система диференціальних рівнянь, що описує динаміку m -х гармонік хвиль сигналу та ХПЗ у плазмово-пучковому СЛВЕ із гвинтовим пучком і Н-убітронною накачкою.

Особливістю Н-убітронної моделі СЛВЕ порівняно з доплертронною є те, що у такій системі має місце ще один механізм додаткового підсилення хвиль – циклотронна нестійкість. Зазначимо, що для циклотронних хвиль, які підсилюються в плазмово-пучковому СЛВЕ Н-убітронного типу, швидкість зміни їх фази приблизно дорівнює ларморівській частоті обертання електронів гвинтового РЕП у магнітному полі: $\omega_{1,1} - k_{1,1} \cdot v_{bz} \approx \pm \omega_H / \gamma_b$. Це приводить до резонансної взаємодії між електронним пучком та електромагнітною хвилею. Ця взаємодія характеризується повільною фазою $\omega_{1,1} - k_{1,1} \cdot v_{bz} \mp \omega_H / \gamma_b \approx 0$. З урахуванням вищевикладених особливостей була побудована самоузгоджена кубічно-нелінійна система диференціальних рівнянь для комплексних амплітуд гармонік електромагнітних полів взаємодіючих хвиль, що одночасно враховує плазмово-пучкову, циклотронну та параметричну нестійкості. Також ця система враховує множинні параметричні взаємодії вищих гармонік хвилі ХПЗ.

У третьому підрозділі проаналізовані режими роботи плазмово-пучкового супергетеродинного ЛВЕ Н-убітронного типу з гвинтовим релятивістським електронним пучком. На рис. 8 зображені дисперсійні криві хвиль сигналу (рис. 8, штрихові криві 1–4) та ХПЗ (рис. 8, суцільні криві 5). Кривим 1 та 2 відповідають звичайна та незвичайна електромагнітні хвилі, кривим 3 та 4 відповідають швидка та повільна циклотронні електромагнітні хвилі, відповідно. Точці O на рис. 8

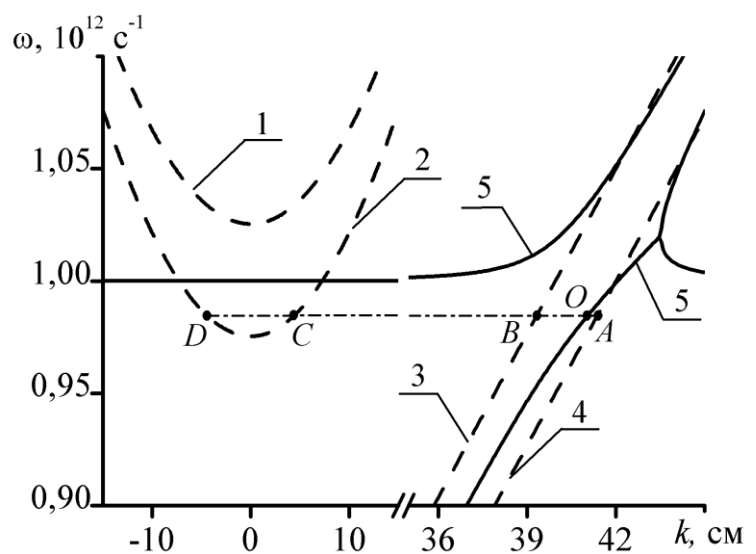


Рис. 8. Дисперсійні криві хвилі сигналу (1, 2, 3, 4) та ХПЗ (5) у плазмово-пучковому СЛВЕ з Н-убітронною накачкою і гвинтовим РЕП

відповідають частота $\omega_{3,1}$ і хвильове число $k_{3,1}$ першої гармоніки ХПЗ за умови максимального значення інкременту плазмово-пучкової нестійкості. Рис. 8

побудований для випадку кута вльоту електронного пучка $\beta = 20^\circ$. Через точку O проведена горизонтальна лінія (рис. 8, штрихпунктирна лінія AD), яка відповідає умові, що частоти хвиль сигналу і ХПЗ однакові $\omega_1 = \omega_3 = const$. Точкам перетину A, B, C, D відповідають частоти $\omega_{1,1}$ і хвильові числа $k_{1,1}$ сигналу, які можуть брати участь у параметричному резонансі. Таким чином, у досліджуваному плазмово-пучковому супергетеродинному ЛВЕ із гвинтовим РЕП мають місце чотири режими роботи, які відповідно до рис. 8 позначені як A, B, C, D .

У четвертому підрозділі були проведені аналіз рівнів та механізмів насичення для режимів роботи A, B, C, D плазмово-пучкового СЛВЕ із гвинтовим РЕП Н-убітронного типу, а також аналіз впливу множинних параметричних взаємодій вищих гармонік ХПЗ на динаміку хвиль системи.

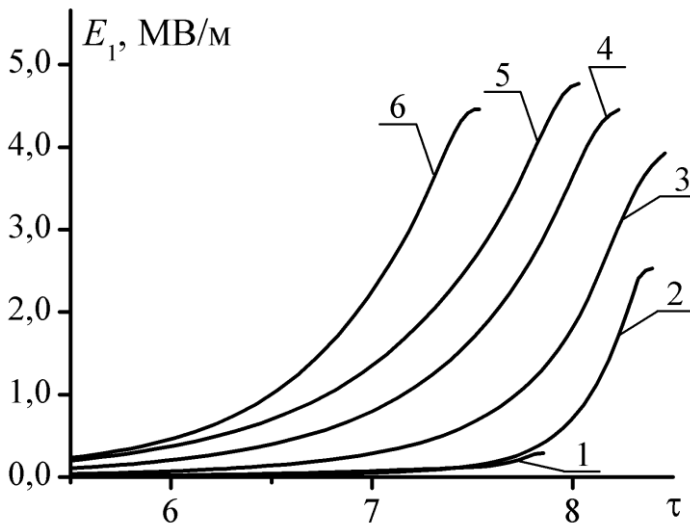


Рис. 9. Залежності амплітуд перших гармонік напруженості електричного поля хвилі сигналу від нормованого часу: 1 – $\beta = 0^\circ$; 2 – $\beta = 10^\circ$; 3 – $\beta = 20^\circ$; 4 – $\beta = 30^\circ$; 5 – $\beta = 37^\circ$; 6 – $\beta = 50^\circ$

пов'язано з тим, що при збільшенні кута β інкремент плазмово-пучкової нестійкості також збільшується за рахунок зменшення поздовжнього релятивістського фактору пучка. Цей ефект має місце для режимів роботи A, B, C, D . Зазначимо, що рівні насичення електромагнітної хвилі сигналу в інших режимах роботи СЛВЕ у два та більше разів менші, ніж у режимі B .

Проведено аналіз динаміки хвиль з урахуванням множинних параметричних взаємодій гармонік ХПЗ у плазмово-пучковому СЛВЕ з гвинтовим РЕП. На рис. 10 подана залежність амплітуди першої гармоніки напруженості електричного поля хвилі сигналу від нормованого часу в режимі роботи C при куті вльоту пучка $\beta = 30^\circ$. Крива 1 враховує лише перші гармоніки взаємодіючих хвиль, а крива 2 враховує перші 10 гармонік хвилі просторового заряду. Як впливає з рис. 10, множинні параметричні взаємодії знижують рівень насичення хвилі сигналу вдвічі. Таким чином, для побудови кубічно-нелінійної теорії плазмово-пучкового СЛВЕ із

На рис. 9 подані залежності амплітуд перших гармонік напруженості електричного поля E_1 хвилі сигналу від нормованого часу для режиму B . Як впливає з рис. 9, за умови збільшення кута вльоту β РЕП рівень насичення хвилі сигналу збільшується, досягаючи максимуму, коли кут $\beta \approx 37^\circ$. Цей максимум обумовлений збігом кроку гвинтового електронного пучка з періодом ондуляції магнітного поля накачки $\Lambda_B \approx h$. У результаті цього відбувається ефективне збільшення інтенсивності накачки.

Зазначимо, що темпи підсилення також зростають при збільшенні кута вльоту пучка. Це

гвинтовим РЕП необхідно обов'язково враховувати мультигармонічні взаємодії хвиль.

Із рис. 10 можна легко визначити потужність електромагнітної хвилі сигналу, що дорівнює ~ 4 МВт (сила струму 100 А, індукція магнітного поля накачки 0,06 Тл). Довжина хвилі сигналу при цьому дорівнює $\lambda_1 \approx 1,9$ мм. Таким чином, плазмово-пучковий супергетеродинний ЛВЕ Н-убітронного типу із гвинтовим РЕП може використовуватись як джерело потужного когерентного електромагнітного сигналу в міліметровому діапазоні довжин хвиль за умови достатньо помірних вимог до параметрів таких пристроїв.

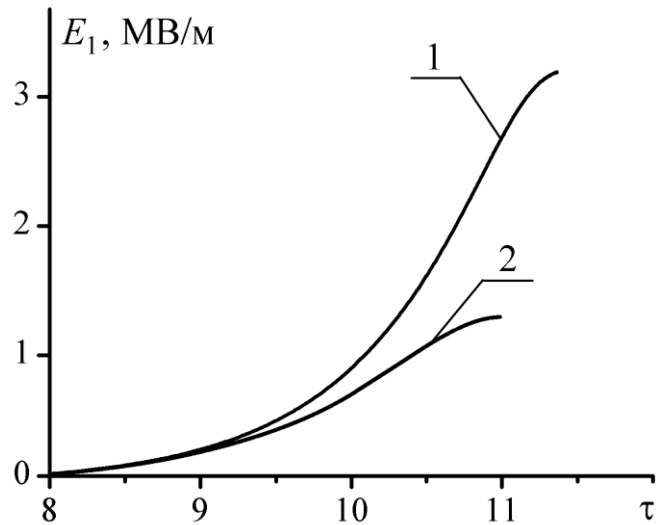


Рис. 10. Залежності амплітуд перших гармонік напруженості електричного поля хвилі сигналу від нормованого часу: 1 — без урахування множинних резонансів ХПЗ; 2 — з урахуванням множинних резонансів ХПЗ

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі побудовані кубічно-нелінійні теорії плазмово-пучкових супергетеродинних лазерів на вільних електронах із гвинтовими релятивістськими електронними пучками доплертронного та Н-убітронного типів з урахуванням множинних параметричних взаємодій. Основні результати роботи полягають у наступному.

1. Уперше встановлено, що в плазмово-пучкових супергетеродинних ЛВЕ з гвинтовими електронними пучками як доплертронного, так і Н-убітронного типу має місце істотне збільшення коефіцієнта підсилення електромагнітної хвилі сигналу за умови збільшення кута вльоту електронного пучка. З'ясовано, що цей ефект має релятивістський характер, пов'язаний зі зміною поздовжньої кінетичної енергії електронів пучка та обумовлений залежністю інкременту зростання плазмово-пучкової нестійкості від кута вльоту РЕП. За умови збільшення кута вльоту пучка з 0° до 30° інкремент зростання хвиль збільшується більше ніж на 20%.

2. Уперше побудована самоузгоджена кубічно-нелінійна теорія мультигармонічних взаємодій хвиль у плазмово-пучкових супергетеродинних ЛВЕ з гвинтовими РЕП як з доплертронною так і Н-убітронною накачками. Отримано систему кубічно-нелінійних диференціальних рівнянь для амплітуд гармонік електромагнітних полів хвиль, яка описує динаміку хвиль, що взаємодіють, з урахуванням мультигармонічних резонансів.

3. Показано, що множинні параметричні резонанси призводять до якісної зміни динаміки хвиль, зокрема до зменшення рівнів насичення хвилі сигналу. Встановлено, що насичення в плазмово-пучкових СЛВЕ з гвинтовими релятивістськими електронними пучками обумовлено захопленням електронів пучка плазмовими хвилями.

4. Установлено, що в плазмово-пучковому супергетеродинному ЛВЕ із гвинтовим РЕП доплертронного типу можлива реалізація чотирьох режимів роботи приладу. З'ясовано, що режим роботи, коли у трихвильовому параметричному резонансі бере участь незвичайна циркулярно-поляризована електромагнітна хвиля сигналу, характеризується коефіцієнтом підсилення, який перевищує коефіцієнт підсилення в інших режимах більше ніж удвічі.

5. З'ясовано, що в плазмово-пучковому супергетеродинному ЛВЕ Н-убітронного типу для режиму роботи, в якому використовується швидка циклотронна електромагнітна хвиля сигналу коефіцієнт підсилення хвилі сигналу перевищує інші майже удвічі. Знайдено оптимальний кут вльоту електронного пучка ($\sim 37^\circ$) відносно поздовжнього магнітного поля, коли підсилення хвилі сигналу є максимальним. Установлено, що в цьому разі має місце збіг кроку гвинтового пучка з періодом ондуляції магнітного поля накачки, у результаті цього відбувається ефективно збільшення поля накачки.

6. Установлено, що в плазмово-пучкових супергетеродинних ЛВЕ із гвинтовими РЕП, за помірних вимог до параметрів системи (концентрація електронів пучка $1,3 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$, енергія пучка 0,5 МеВ, струм пучка 100 А) можливе створення потужної електромагнітної хвилі сигналу в міліметровому діапазоні довжин хвиль (довжина хвилі сигналу 1,8 мм) із вихідною потужністю $\sim 16 \text{ МВт}$ та ККД $\sim 30\%$.

7. Подальшого розвитку набув метод усереднених характеристик для вирішення мультигармонічних задач у потужнострумівих приладах, що використовують гвинтові РЕП. У рамках цього методу була запропонована нова заміна змінних, яка дозволила підвищити ефективність алгоритму асимптотичного інтегрування.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

1. Nonlinear theory of plasma-beam superheterodyne free electron laser of dopplertron type with non-axial injection of electron beam / V. V. Kulish, A. V. Lysenko, **G.A. Oleksiienko** et al. // Acta Physica Polonica A. – 2014. – Vol. 126, No. 6. – P. 1263–1268.
2. Супергетеродинные плазменно-пучковые ЛСЭ с винтовыми электронными пучками / В. В. Кулиш, А. В. Лысенко, **Г. А. Алексеенко** и др. // Прикладная физика. – 2014. – № 5. – С. 24–28.
3. Модернізований метод усереднених характеристик для розв'язування задач мультигармонічних резонансних взаємодій у пристроях сильнострумівой

- електроніки / В.В. Куліш, О.В. Лисенко, **Г.А. Олексієнко** та ін.// Ж. нано-електрон. фіз. – 2015. – Т. 7, № 2. – С. 02015.
4. Куліш В. В. Мультигармонічні взаємодії хвиль в плазменно-пучковому супергетеродинамічному ЛСЭ з винтовими електронними пучками / В. В. Куліш, А. В. Лисенко, **Г. А. Алексеєнко** // Успехи прикладної фізики. – 2015. – Т. 3, № 5. – С. 438–446.
 5. Kulish V. V. Nonlinear interaction of waves in plasma-beam superheterodyne FEL of the dopplertron type with helical electron beam / V. V. Kulish, A. V. Lysenko, **G. A. Oleksiienko** // Problems of Atomic Science and Technology. 2015. No. 6(100). — P. 83-89.
 6. Лисенко О.В. Застосування модернізованого методу усереднених характеристик в задачах теорії плазмово-пучкових супергетеродинамічних лазерів на вільних електронах / О. В. Лисенко, **Г. А. Олексієнко**, М. О. Феденко // Ж. нано-електрон. фіз. – 2015. – Т. 7, № 4. – С. 04083.
 7. Лисенко А. В. Плазменно-пучковий супергетеродинамічний ЛСЭ з Н-убитронною накачкою з неосевою інжекцією електронного пучка / А. В. Лисенко, **Г. А. Алексеєнко** // Радиофізика и електроніка. – 2016. – Т. 7 (21), № 1. – С. 48–54.

Праці апробаційного характеру

8. **Oleksiienko G. A.** Influence of injection angle of electron beam on dynamics of waves in plasma-beam superheterodyne free electron laser of dopplertron type / G. A. Oleksiienko, V. V. Kulish, A. V. Lysenko // 15th International Young Scientists Conference Optics and High Technology Material Science (SPO 2014) : Scientific Works (Kiev, Ukraine, 23–26, October, 2014). – Kiev, 2014. – С. 143.
9. **Oleksiienko G. A.** Nonlinear wave interaction in plasma-beam superheterodyne FEL of H-ubitron type with a helical electron beam / G. A. Oleksiienko, V. V. Kulish, A. V. Lysenko // 16th International Young Scientists Conference Optics and High Technology Material Science (SPO 2015) : Scientific Works (Kiev, Ukraine, 22–25, October, 2015). – Kiev, 2015. – С. 155.
10. To the theory of plasma-beam superheterodyne free electron laser of the dopplertron type with a helical electron beam / A. V. Lysenko, **G. A. Oleksiienko**, V. V. Koval, M. Yu. Rombovsky // 10th International Conference «Electronics and Applied Physics» (APHYS 2014) : Conference Proceedings (Kiev, Ukraine, 22-25, October, 2014). – Kiev, 2014. – С. 138–139.
11. Lysenko A. V. Cubic-nonlinear theory of the plasma-beam superheterodyne FEL dopplertron type with non-axial injection of electron beam / A. V. Lysenko, **G. A. Oleksiienko** // 11th International Conference «Electronics and Applied Physics» (APHYS 2015) : Conference Proceedings (Kiev, Ukraine, 21-24, October, 2015). – Kiev, 2015. – С. 145–146.
12. Лисенко О. В. Кубічна нелінійна теорія плазмово-пучкового супергетеродинамічного ЛВЕ доплертронного типу з неосевою інжекцією електронного пучка / О. В. Лисенко, **Г. А. Олексієнко** // Міжнародна

конференція молодих учених і аспірантів (ІЕФ-2015) : матеріали конференції (Ужгород, Україна, 18–22 травня, 2015). – Ужгород, 2015. – С. 65.

13. Лысенко А. В. Метод усредненных характеристик для решения мультигармонических задач в сильноточной электронике / А. В. Лысенко, **Г. А. Алексеенко** // Труды 17-го Международного симпозиума «Методы дискретных особенностей в задачах математической физики» (МДОЗМФ-2015) : труды конференции (Харьков – Сумы, Украина, 8–13 июня, 2015). – Сумы, 2015. – С. 142–146.
14. Lysenko A. V. To the theory of superheterodyne plasma-beam free electron laser of the dopplertron type with non-axial electron beam entry / A. V. Lysenko, **G. A. Oleksiienko** // 24th International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology (CriMiCo 2014) : Conference Proceedings (Sevastopol, Ukraine, 7–13, September, 2014). – Sevastopol, 2014. – С. 841–842.

АНОТАЦІЯ

Олексієнко Г. А. Мультигармонічні взаємодії у плазмово-пучкових супергетеродинних лазерах на вільних електронах із 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, 2016.

Дисертаційна робота присвячена теоретичному дослідженню динаміки хвиль та аналізу режимів роботи плазмово-пучкових супергетеродинних лазерів на вільних електронах із гвинтовими релятивістськими електронними пучками з урахуванням мультигармонічних взаємодій.

Побудовані мультигармонічні кубічно-нелінійні теорії плазмово-пучкових супергетеродинних ЛВЕ з гвинтовими РЕП доплертронного та Н-убітронного типів. З'ясовано, що темпи зростання хвиль у плазмово-пучкових СЛВЕ підвищуються при збільшенні кута вльоту електронного пучка. Отримано, що множинні параметричні взаємодії гармонік хвиль призводять до зміни динаміки хвиль у системі, зокрема зменшують рівень насичення у два і більше разів. Визначені рівні та механізми насичення електромагнітної хвилі сигналу. Знайдені оптимальні режими роботи плазмово-пучкових СЛВЕ з гвинтовими РЕП, у яких потужність електромагнітної хвилі сигналу є максимальною. Встановлено, що такі пристрої можна використовувати як потужні джерела когерентного електромагнітного випромінювання в міліметровому діапазоні довжин хвиль.

Ключові слова: лазери на вільних електронах, плазмово-пучкова нестійкість, гвинтовий релятивістський електронний пучок, трихвильовий резонанс, мультигармонічні взаємодії.

АННОТАЦИЯ

Алексеевко Г. А. Мультигармонические взаимодействия в плазменно-пучковых супергетеродинных лазерах на свободных электронах 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, 2016.

Диссертационная работа посвящена теоретическому исследованию динамики волн и режимов работы плазменно-пучковых супергетеродинных лазеров на свободных электронах с винтовыми релятивистскими электронными пучками с учетом мультигармонических взаимодействий.

Построены мультигармонические кубически-нелинейные теории плазменно-пучковых супергетеродинных ЛСЭ с винтовыми РЭП как доплертронного, так и Н-убитронного типа. Получены системы дифференциальных уравнений для амплитуд гармоник электромагнитных полей волн в кубическом приближении, которые учитывают множественные параметрические взаимодействия гармоник волн. Выяснено, что темпы нарастания волн в плазменно-пучковых супергетеродинных ЛСЭ увеличиваются при увеличении угла влета электронного пучка. Показано, что данный эффект определяется плазменно-пучковой неустойчивостью и связан с изменением продольной энергии пучка при изменении угла влета РЭП.

Определены уровни и механизмы насыщения электромагнитной волны сигнала в режиме максимального усиления. Найдены оптимальные режимы работы плазменно-пучковых СЛСЭ с винтовыми РЭП, в которых мощность электромагнитной волны сигнала имеет максимальное значение. Показано, что в доплертронном плазменно-пучковом СЛСЭ с винтовым РЭП возможна реализация четырех режимов взаимодействия волн. Выяснено, что режим работы, в котором используется необыкновенная электромагнитная волна сигнала, имеет наибольший коэффициент усиления по сравнению с другими режимами работы. Продемонстрировано, что для плазменно-пучкового супергетеродинного ЛСЭ с винтовым РЭП Н-убитронного типа наиболее оптимальным с точки зрения практической реализации является режим работы, в котором используется медленная циклотронная электромагнитная волна сигнала. Для данного режима взаимодействия определен оптимальный угол влета РЭП, при котором достигается максимальное усиление электромагнитного сигнала по сравнению с другими режимами работы этого устройства.

Выяснено, что множественные параметрические взаимодействия гармоник волн качественно влияют на динамику волн в системе, а именно понижают уровень насыщения волн. Показано, что механизм насыщения в плазменно-пучковых супергетеродинных ЛСЭ с винтовыми РЭП связан с захватом электронов пучка плазменными волнами. Выяснено, что такие устройства могут использоваться в качестве мощного источника когерентного электромагнитного излучения в миллиметровом диапазоне длин волн.

Ключевые слова: лазеры на свободных электронах, плазменно-пучковая неустойчивость, винтовой релятивистский электронный пучок, трехволновой резонанс, мультигармонические взаимодействия.

ABSTRACT

Oleksiienko G. A. Multiharmonic interaction in plasma-beam superheterodyne free electron lasers with helical electron beams. – Manuscript.

Thesis for degree of the Doctor of Philosophy in physics and mathematics sciences on speciality 01.04.01 – Physics of Devices, Components and Systems. – Sumy State University, Sumy, 2016.

The thesis is devoted to the theoretical study of the wave dynamics and operating modes analysis of plasma-beam superheterodyne free electron lasers (FEL) with helical relativistic electron beams (REB) taking into account multiharmonic interactions.

Multiharmonic cubic-nonlinear theories of plasma-beam superheterodyne FELs with helical REBs of dopplertron and H-ubitron types are constructed. It is found that the growth rate of waves increase with increasing of the electron beam injection angle in plasma-beam superheterodyne FELs. It is shown, that plural parametric interactions of wave harmonics result in decrease of the signal saturation two and more times. The saturation levels and mechanisms have been found. Optimal mode of plasma-beam SFELs with helical REBs has been obtained. This operation mode has maximum power of the electromagnetic wave signal. It was demonstrated that plasma-beam SFEL with helical electron beams can be used as powerful sources of coherent electromagnetic radiation in the millimeter wavelength range.

Keywords: free electron laser, beam-plasma instability, helical relativistic electron beam, three-wave resonance, multiharmonic interactions.

Підписано до друку 14.11.2016.
Формат 60×90/16. Ум. друк. арк. 1,1. Обл.-вид. арк. 0,9. Тираж 100 пр. Зам. № 907.

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