

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

ОДАРЕНКО ЄВГЕН МИКОЛАЙОВИЧ

УДК 621.385.6:537.874

**НЕЛІНІЙНА ТРЬОХВИМІРНА ТЕОРІЯ КОМБІНОВАНИХ
ЕЛЕКТРОННО-ХВИЛЕВИХ СИСТЕМ О-ТИПУ
ММ ТА СУБММ ДІПАЗОНУ**

Спеціальність – 01.04.01 – фізика приладів, елементів і систем

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора фізико-математичних наук

Харків – 2012

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Харківському національному університеті радіоелектроніки та Харківському національному університеті імені В. Н. Каразіна Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України

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

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор Буц Вячеслав Олександрович, Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України, начальник лабораторії

доктор фізико-математичних наук, професор Воробйов Геннадій Савелійович, Сумський державний університет, професор кафедри наноелектроніки

доктор фізико-математичних наук, професор Дробахін Олег Олегович, Дніпропетровський національний університет імені Олеся Гончара, завідувач кафедри прикладної і комп'ютерної радіофізики

Захист відбудеться “ 26 ” грудня 2012 р. о 13 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.052.04 Харківського національного університету радіоелектроніки (61166, м. Харків, пр. Леніна, 14).

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Харківського національного університету радіоелектроніки: 61166, м. Харків, пр. Леніна, 14.

Автореферат розіслано “ ____ ” листопада 2012 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради



Б. Г. Бородін

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Проблема створення елементної бази для освоєння короткохвильової частини мм і субмм діапазону посідає значне місце в сучасній радіофізиці. Освоєння більш високочастотних діапазонів є насущним завданням через зростаючі потреби в широкосмугових каналах зв'язку, підвищенні роздільної здатності радіолокаційних засобів, удосконалюванні обладнання для спектроскопії, медичних цілей і т. д.

Основні фактори, що обмежують застосування класичних електровакуумних приладів НВЧ на більш високих частотах, обумовлені насамперед поверхневим характером полів, з якими взаємодіє електронний потік, і технологічними проблемами, пов'язаними з мініатюризацією конструктивних елементів і різко зростаючими вимогами до електронно-оптичної системи. Важливим етапом на шляху створення ефективних приладів малої й середньої потужності мм і субмм діапазону стала розробка оротронів і генераторів дифракційного випромінювання.

Основні теоретичні результати, які дозволили встановити закономірності фізичних процесів у генераторах і підсилювачах оротронного типу, були отримані переважно в рамках одновимірного наближення. Такий підхід виявився цілком виправданим для приладів довгохвильової й середньої частини мм діапазону й забезпечив створення чисельних моделей, що не вимагають значних обчислювальних ресурсів. Разом з тим, укорочення робочої довжини хвилі призвело до зростання ролі факторів, які не враховуються в одновимірних моделях. Насамперед це істотна неоднорідність поля поверхневої хвилі за товщиною пучка й поперечні зсуви траєкторій електронів, обумовлені параметрами електронно-оптичної системи, взаємодією з декількома компонентами високочастотного поля синхронної хвилі й полем просторового заряду. Як наслідок, відбувається зміна повного струму пучка в просторі взаємодії за рахунок осідання електронів на поверхню електродинамічної системи і, відповідно, зміна умов електронно-хвильової взаємодії на всіх етапах розвитку коливального процесу.

Наявність статичних і динамічних поперечних зсувів траєкторій електронів обумовлена скінченністю індукції магнітостатичного поля. У реальних пристроях це поле зазвичай є просторово-неоднорідним за рахунок конструктивних особливостей фокусуєчих систем. Крім того, тривимірний характер руху електронів породжує набір поперечних хвиль пучка – циклотронних і синхронних, які разом з поздовжніми хвилями просторового заряду також вносять вклад в енергетичний баланс електронно-хвильової системи.

Урахування зазначених явищ, а також багатьох інших, є необхідною умовою для створення достовірних фізичних і математичних моделей, що адекватно описують закономірності процесів, які відбуваються у приладах.

Тому актуальною є задача розробки багатовимірних моделей електронно-хвильових систем мм і субмм діапазону, які дозволяють враховувати максимальну кількість фізичних факторів і механізмів, властивих даним

пристроєм, і забезпечують можливість оперативного розрахунку основних експлуатаційних характеристик. Слід зазначити, що потреба в таких моделях існує для систем з різними видами енергообміну, оскільки поряд з резонансними приладами оротронного типу в мм і субмм діапазоні використовуються різні модифікації нерезонансних приладів на зворотній хвилі (ЛЗХ). Крім того, комбінування коливальних і хвильових систем в одному приладі є одним з перспективних способів поліпшення їхніх експлуатаційних характеристик і створення нових ефективних схем приладів.

Основою для створення розрахункової моделі є нелінійна самоузгоджена теорія електронно-хвильової взаємодії, розмірність якої визначається набором фізичних факторів, що обумовлюють закономірності енергообміну пучка з полем. Оскільки одним зі способів підвищення потужності електронного потоку є збільшення швидкості заряджених часток, то в загальному випадку теорія має також враховувати релятивістські ефекти.

Дисертаційна робота присвячена розробці нелінійної трьохвимірної теорії комбінованих електронно-хвильових систем О-типу мм і субмм діапазону, у загальному випадку релятивістських, з довільним просторовим розподілом неоднорідного фокусуєчого поля. Одночасне використання двох моделей для резонансного й нерезонансного енергообміну в приладах із тривалою взаємодією дозволяє проводити аналіз нелінійних явищ для різноманітних конфігурацій електронно-хвильових систем.

Зв'язок роботи з науковими програмами. Дослідження, матеріали яких містяться в дисертації, проводилися в Харківському національному університеті радіоелектроніки на кафедрі фізичних основ електронної техніки та у Харківському національному університеті імені В. Н. Каразіна на кафедрі фізики надвисоких частот. Дисертаційні дослідження пов'язані з виконанням таких фундаментальних держбюджетних тем, у яких здобувач був відповідальним виконавцем:

- «Розробка теорії розповсюдження ширококутових імпульсних сигналів у багатошарових матеріальних магнітодіелектричних середовищах та збудження потужних коливань мм діапазону на нових принципах взаємодії» (номер державної реєстрації 0194U018561, 1994-1996 р.);
- «Побудова нелінійної теорії взаємодії несінусоїдальних електромагнітних сигналів з електронними потоками та матеріальними середовищами в розподілених системах мм діапазону» (номер державної реєстрації 0197U015760, 1997-1999 р.);
- «Взаємодія електромагнітних хвиль та хвильових пакетів з пасивними гіротропними середовищами та активними багатопучковими електронними системами» (номер державної реєстрації 0100U003341, 2000-2002 р.);
- «Когерентне випромінювання в нелінійних електронно-хвильових системах та його взаємодія з шаруватими та частотодисперсними середовищами» (номер державної реєстрації 0103U004245, 2003-2005 р.);
- «Нестационарні процеси в коливальних системах мм діапазону та перетворення когерентного випромінювання в керованих

електродинамічних структурах» (номер державної реєстрації 0106U001547, 2006-2008 р.);

- «Нелінійна електронно-хвильова двоережимна взаємодія на поверхневих та об'ємних хвилях субтерагерцового діапазону» (номер державної реєстрації 0109U000551, 2009-2011 р.).

Мета і задачі дослідження. Метою дослідження є розвиток нелінійної теорії електронно-хвильової взаємодії в комбінованих приладах мм і субмм діапазону при трьохвимірному русі електронів у неоднорідному магнітостатичному полі. На цій основі визначення вихідних характеристик приладів, оптимальних режимів взаємодії в підсилювальних та помножувальних каскадах при силовому й параметричному зовнішньому впливі, а також розробка концепції побудови теорії нового класу приладів з фотонно-кристалічними структурами, що сповільнюють.

Для досягнення поставленої мети необхідно було розв'язати такі задачі:

- одержати самоузгоджену систему нелінійних трьохвимірних рівнянь, у загальному випадку релятивістських, з відповідними початковими умовами на резонансних і нерезонансних ділянках простору взаємодії комбінованих приладів О-типу;
- виробити концепцію комбінованих електронно-хвильових систем зі стрічковими електронними потоками й просторово-неоднорідним фокусуєчим полем;
- розробити моделі різних комбінованих неавтономних систем мм і субмм діапазону для підсилення потужності та помноження частоти;
- визначити фізичні закономірності багатовимірної електронно-хвильової взаємодії з урахуванням просторового розподілу високочастотних і статичних полів, а також силового й параметричного зовнішнього впливу;
- визначити оптимальні режими енергообміну електронів з високочастотними полями на різних ділянках простору взаємодії комбінованих приладів для різних рівнів потужності сигналів;
- виробити принципи побудови електронно-хвильових систем короткохвильової частини субмм-діапазону на основі фотонно-кристалічних структур, що сповільнюють.

Об'єктом дослідження є процес самоузгодженої взаємодії між спрямованими потоками заряджених часток і багатокомпонентними електромагнітними полями у резонансних і нерезонансних електронно-хвильових системах.

Предмет дослідження – фізичні закономірності поздовжньої й поперечної нелінійної електронно-хвильової взаємодії та вихідні енергетичні й частотні характеристики комбінованих приладів О-типу мм і субмм-діапазону з урахуванням тривимірних траєкторій електронів і неоднорідності електромагнітного поля у просторі взаємодії.

Методи дослідження. Проведені в дисертації теоретичні дослідження базуються на самоузгодженій системі інтегро-диференціальних рівнянь

електронно-хвильової взаємодії, що складається з векторного рівняння руху електронів і рівняння збудження електромагнітного поля потоком заряджених часток, яке отримане з рівнянь Максвелла із застосуванням методу повільно мінливих амплітуд. Аналітичні результати отримані із застосуванням відомих методів математичної фізики, теорії диференціальних рівнянь і теорії спеціальних функцій. Для чисельних розрахунків використовувалися добре апробовані в електроніці НВЧ метод великих часток і метод Рунге-Кутти 4-го порядку.

Наукова новизна отриманих результатів:

- розвинена багатовимірною самоузгоджена теорія автономних електронно-хвильових систем О-типу: оротрон, ГДВ, ледатрон, ладдертрон, клінотрон, узагальнена на випадок релятивістських швидкостей електронного потоку та довільного просторового розподілу магнітостатичного поля.

- урахування у постановці задачі основних факторів, які обумовлюють багатовимірність електронно-хвильової взаємодії (траєкторії електронів, багатовимірність і неоднорідність високочастотних і статичних полів, у тому числі магнітних фокусуєчих тощо), дозволило виявити причини спостережуваних фізичних явищ і спрогнозувати їхні вихідні характеристики, а також створити на цій основі адекватні фізичні й математичні моделі складних електронно-хвильових систем О-типу;

- отримано аналітичні вирази для середньої комплексної крутості коливальної характеристики релятивістських і нерелятивістських приладів розглянутого класу з різним розподілом високочастотного поля у слабкосигнальному наближенні для різних законів зміни фокусуєчого магнітного поля.

- показано, що осідання електронів на поверхню системи, що сповільнює, обумовлює на нелінійній стадії процесу звуження області коливального гістерезису в зонах генерації аж до його зникнення за рахунок збільшення кількості пролітних часток відносно захоплених високочастотним полем. Це дозволяє уточнити нелінійну теорію релятивістських систем із скінченим значенням індукції фокусуєчого магнітного поля;

- виявлено підвищення ефективності взаємодії за рахунок вирівнювання умов групування електронів за товщиною електронного потоку на основі розв'язання системи нелінійних рівнянь для нерезонансних секціонованих систем з інвертованим розташуванням періодичних структур у різних каскадах. У рамках багатовимірної моделі для неавтономних розподілених систем О-типу вперше виявлений ефект часткової компенсації високочастотного розшарування стрічкового електронного потоку за допомогою формування лінійного розподілу початкових швидкостей парціальних пучків, що забезпечує підвищення коефіцієнта підсилення у 1.5 рази (в децибелах);

- вперше виявлено зсув смуги синхронізації неавтономної електронно-хвильової системи за частотною шкалою та зміну її ширини за рахунок параметричного впливу фокусуєчого магнітного поля на середню крутість коливальної характеристики. Це забезпечує можливість керування експлуатаційними характеристиками приладів через зміну параметрів

просторового розподілу магнітостатичного поля. В режимі підсилення та синхронізації виявлено асиметрію резонансних характеристик відносно кривої точного резонансу, що дозволяє уточнити теоретичний аналіз неавтономних коливальних систем за умови підвищення потужності вхідного сигналу;

- встановлено підвищення ефективності помноження частоти в комбінованій електронно-хвильовій системі за умови зменшення індукції магнітостатичного поля завдяки поперечній взаємодії. Так, зокрема, знайдено інтервали значень нормованої циклотронної частоти, у яких спостерігається збільшення амплітуди вихідного сигналу в 1.5-2 рази порівняно з випадком замагніченого електронного потоку.

- у режимі параметричної синхронізації коливань комбінованого помножувача частоти завдяки формуванню лінійного розподілу початкових швидкостей парціальних пучків спостерігається збільшення вихідної амплітуди на вищих гармоніках частоти вхідного сигналу в 1.5-2 рази порівняно з випадком, коли всі електрони мають однакові початкові швидкості;

- вперше проведене багатовимірне моделювання електронно-хвильової взаємодії у хвилеводному каналі фотонно-кристалічних структур різних конфігурацій зі стрічковим електронним потоком. Встановлено, що вибором геометричних параметрів електронного потоку досягається збільшення ефективності взаємодії майже вдвічі, що обумовлено вирівнюванням умов електронно-хвильового енергообміну за товщиною багатопучкового пучка.

Практичне значення отриманих результатів. Отримані в роботі результати є основою для розробки ефективних багатокаскадних електровакуумних приладів малої та середньої потужності мм- і субмм-діапазону, у тому числі й комбінованих.

Розроблені багатовимірні моделі взаємодії електронних потоків з високочастотними й статичними полями резонансних коливальних і нерезонансних хвильових систем дозволяють створити програмне забезпечення для розрахунку експлуатаційних характеристик (пусковий струм, потужність коливань, електронний ККД, електронний зсув частоти) і виробляти практичні рекомендації з удосконалення існуючих і створення нових електронних приладів різного функціонального призначення – генераторів, підсилювачів, помножувачів частоти тощо.

У рамках самоузгодженої тривимірної теорії виявлені ефективні режими роботи комбінованих електронних приладів для різних рівнів потужності вхідних сигналів, значень індукції фокусуєчого поля й інших незалежних параметрів електронно-хвильової системи.

Комп'ютерні програми розрахунку мікро- й макропроцесів електронно-хвильової взаємодії створені на основі апробованих у НВЧ-електроніці методів і алгоритмів. Вони можуть використовуватися для розрахунку автономних і неавтономних коливальних і хвильових систем зі стрічковими потоками заряджених часток і комбінованими (резонансними й нерезонансними) електродинамічними системами різних конфігурацій.

Запропонована в роботі концепція застосування двовимірних фотонно-кристалічних структур в електронних приладах О-типу з релятивістськими й

нерелятивістськими пучками заряджених часток становить практичний інтерес у плані створення схем приладів короткохвильової частини субмм-діапазону з електродинамічними системами нового покоління.

Крім того, результати дисертації з багатовимірного моделювання лінійних і нелінійних процесів енергообміну електронних потоків з високочастотними й статичними полями використовуються в навчальному процесі для створення нових розділів у курсах, присвячених вивченню фізичних закономірностей взаємодії електромагнітних полів з активними середовищами.

Особистий внесок автора. Основні результати, отримані в дисертації, належать автору. У роботах, які опубліковані за темою дисертації разом зі співавторами, особистий внесок автора полягає в наступному.

У роботах [1-5, 23] автор безпосередньо брав участь у постановці задачі, одержанні системи тривимірних релятивістських і нерелятивістських рівнянь руху, рівнянь збудження для нерезонансних і резонансних електронно-хвильових систем, проводив чисельні розрахунки і брав участь в аналізі отриманих результатів.

У роботі [13] автору належить виконання теоретичної частини, проведення чисельних розрахунків і зіставлення їхніх результатів з експериментальними даними.

У роботах [19, 44-48] автор брав участь у розробці фізичної моделі двочастотного джерела випромінювання мм- і субмм-хвиль, розробив математичну модель, здійснював чисельне моделювання й аналізував результати розрахунків.

У роботах [6, 15, 25-29] автор брав участь у постановці задачі, визначав параметри для чисельних розрахунків лінійних і нелінійних характеристик релятивістських електронно-хвильових систем, проводив чисельні розрахунки енергетичних і частотних характеристик резонансного релятивістського генератора із тривалою взаємодією, проводив аналіз отриманих результатів.

У роботах [11, 18, 30, 38, 42, 43] автором проведена постановка задачі про багатовимірну електронно-хвильову взаємодію в нерезонансних приладах, отримані розрахункові співвідношення й проведений аналіз результатів розрахунків енергетичних і частотних характеристик.

У роботах [8-10, 12, 14, 16, 21, 31-36] автор визначав напрямки дослідження комбінованих електронно-хвильових систем, одержував основні розрахункові співвідношення, проводив чисельні розрахунки характеристик неавтономних коливальних систем і брав участь в аналізі та фізичній інтерпретації отриманих результатів.

У роботі [37] автору належить формування структури публікації, проведення чисельних розрахунків і виконання теоретичної частини роботи.

У роботах [17, 22, 39-41] автору належить розробка комбінованих схем помножувачів частоти, одержання систем інтегро-диференціальних рівнянь для визначення експлуатаційних характеристик, проведення чисельних розрахунків і аналіз результатів.

Автор розробив концепцію застосування фотонно-кристалічних структур в електронно-хвильових системах короткохвильової частини субмм-діапазону, провів аналіз електродинамічних характеристик і моделювання взаємодії стрічкових електронних потоків з полями фотонно-кристалічних хвилеводів різних конфігурацій [49, 50].

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертації проходили апробацію на симпозіумах та міжнародних науково-технічних конференціях:

20th International Conference On Infrared and Millimeter Waves (Orlando, USA, December 11-14, 1995);

Third IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC) (Monterey, USA, April 23-25, 2002);

1-му Міжнародному Радіоелектронному форумі «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» (Харків, Україна, 8-10 жовтня, 2002);

6-14, 16-22 міжнародних Кримських конференціях «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (Севастополь, Україна, 1996-2004, 2006-2012);

TERA*2010 IEEE International Workshop on THz Radiation: Basic Research & Applications (Sevastopol, Ukraine, 12-14 Sept., 2010).

Публікації. Результати дисертації опубліковані в 50 наукових роботах, з них 22 – у наукових спеціалізованих журналах (8 – проіндексовані в науково-метричних базах даних Scopus, SCI-EXPANDED, SSCI, A&HCI, CPCI-SSH); у навчальному посібнику з грифом МОН України; в авторському свідоцтві СРСР; 26 робіт опубліковано у працях міжнародних конференцій (20 – проіндексовані в науково-метричних базах даних Scopus, IEEEExplore, INSPEC, Compendex).

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, восьми розділів, висновків і списку використаних джерел, який містить 395 посилань. Робота містить 111 рисунків. Загальний обсяг дисертації – 345 сторінок, у тому числі основного тексту – 269 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовується актуальність обраної теми, сформульовано мету і задачі дослідження, наукову новизну отриманих результатів та їх практичне значення, описані форми апробації основних результатів роботи.

В першому розділі наведено огляд існуючих підходів до проблеми підвищення ефективності та удосконалення конструкції електровакуумних приладів надвисоких частот при вкороченні робочої довжини хвилі до значень, що відповідають міліметровому та субміліметровому діапазону.

Відзначено основні напрямки підвищення потужності приладів через збільшення первеансу електронних потоків та переходу до релятивістських швидкостей руху електронів у просторі взаємодії. Насамперед, це застосування багатопучкових електронно-оптичних систем, що дозволяє зменшити щільність струму та послабити технічні й технологічні вимоги до електронних гармат.

Комбіновані електронно-хвильові системи дозволяють поєднувати переваги декількох різних за властивостями взаємодії приладів. Наприклад, широкий діапазон частот лампи біжучої хвилі та високий ККД клістронів. Подальший розвиток електроніки супроводжується створенням нових комбінованих систем, що поєднані принципом ефективного збудження електродинамічної системи заздалегідь модульованим електронним потоком.

Застосування комбінованих приладів у режимі помноження частоти також є перспективним напрямком для розробки джерел випромінювання субміліметрового діапазону. Збагачення струму гармонічними складовими може відбуватися в окремому модуляторі або через збудження коливань на низькій вихідній частоті в тій резонансній електродинамічній системі, де відбувається й виділення вищих гармонічних складових цього сигналу. Таким чином формуються двочастотні джерела випромінювання на основі гіроприладів і генераторів оротронного типу.

Скорочення робочої довжини хвилі сигналів існуючих джерел випромінювання міліметрового та субміліметрового діапазону призводить до необхідності урахування багатьох фізичних механізмів, що притаманні лише багатовимірним системам. Зменшення розмірів електродинамічних систем і збільшення щільності струму супроводжується зростанням ролі поперечних складових швидкостей електронів та електромагнітного поля в процесі їх взаємодії. Крім того, неоднорідність високочастотних полів у перетині пучку та статичних фокусуємих полів стає одним із найважливіших факторів впливу на ефективність електронно-хвильової взаємодії. Вірогідне моделювання таких систем може здійснюватися лише на основі нелінійної багатовимірної теорії, що враховує максимальну кількість зазначених механізмів.

На основі проведеного огляду літератури сформульована проблема розробки теоретичного підґрунтя для створення нових ефективних електронно-хвильових систем міліметрового та субміліметрового діапазону. Ця теорія має забезпечувати можливість урахування структури релятивістських та нерелятивістських електронних потоків із скінченними розмірами, їх високочастотного розшарування в неоднорідних полях, поперечної електронно-хвильової взаємодії, просторового розподілу індукції магнітостатичного поля, одночасного застосування моделей резонансних та нерезонансних ділянок простору взаємодії в комбінованих електронно-хвильових системах. Дисертаційна робота спрямована на розв'язання цієї проблеми.

У другому розділі розроблені моделі комбінованих електронно-хвильових систем О-типу, що містять резонансні та нерезонансні ділянки багатовимірного простору взаємодії з довільним просторовим розподілом магнітостатичного поля, що фокусує електрони. Розглядається декілька варіантів реалізації локальної неоднорідності магнітного поля, що дозволяють керувати енергетичними та частотними характеристиками приладів і підвищувати ефективність взаємодії.

Сформульовані основні рівняння, що описують самоузгоджений процес нелінійної електронно-хвильової взаємодії з урахуванням тривимірних траєкторій електронів і декількох координатних компонент електромагнітного

поля. Вихідна система інтегро-диференціальних рівнянь складається з рівнянь руху електрона у високочастотних і статичних полях та рівняння збудження електромагнітного поля модульованим електронним потоком. Векторне рівняння руху з урахуванням релятивістських ефектів записується в такий спосіб:

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{e}{m_0\gamma_0} \operatorname{Re} \left\{ \vec{E} + \vec{E}_q + [\vec{v}, \vec{B}] - \frac{\vec{v}}{c^2} (\vec{v}, (\vec{E} + \vec{E}_q)) \right\}, \quad (1)$$

де \vec{v} – вектор швидкості електрона; e , m_0 – заряд та маса спокою електрона;

$\gamma_0 = \left(1 - \frac{v_0^2}{c^2}\right)^{-\frac{1}{2}}$ – релятивістський фактор; \vec{E} , \vec{E}_q – вихрова та потенційна

частини напруженості електричного поля; \vec{B} – вектор індукції магнітного поля, що складається з високочастотної та статичної частин. Магнітостатичне поле, що фокусує електрони, в загальному випадку має довільний просторовий розподіл. Потенційна частина електричного поля характеризує поле просторового заряду, яке враховується в рамках багаточислової моделі електронного потоку через статичну поперечну частину та високочастотну поздовжню, яка розглядається для кожного шару пучка окремо.

Рівняння збудження у загальному випадку отримуються з рівнянь Максвелла, що містять сторонні струми заданої конфігурації. В комбінованих приладах необхідно окремо розглядати збудження електромагнітного поля в резонансних та нерезонансних системах. Рівняння збудження резонансних систем відповідає модовому поданню електричних та магнітних полів, які збуджуються електронним потоком, і за умови високої добротності електродинамічної системи записується відносно амплітуди електричного поля із застосуванням малого параметра $\hat{\varepsilon}$:

$$\frac{d^2 e_s}{dt^2} + \omega_s^2 e_s = -\hat{\varepsilon} \frac{d}{dt} \left[e_s + \frac{1}{\hat{\varepsilon} N_s} \frac{d}{dt} \int_{\mathcal{V}} \vec{j} \vec{E}_s^* dV \right], \quad (2)$$

де $\omega_s = \omega'_s - i\omega''_s$ – комплексна кругова частота моди з індексом s ; N_s – норма коливань; \vec{j} – щільність струму; \vec{E}_s – власні електричні функції однорідних рівнянь Максвелла.

Застосування асимптотичних методів теорії коливань дозволяє отримати укорочене рівняння збудження відносно нормованої амплітуди поля у багатовимірній системі за умови H_x -поляризації випромінювання (напрямок координатної вісі Oy вважається поздовжнім):

$$\frac{dC_s(t)}{dt} - i(\omega - \omega_s)C_s(t) = \frac{|I_0|}{2\pi N_s \Delta} \int_0^L \int_{\Delta} \int_0^{2\pi} \left[E_{sy}^* + \frac{dz}{dy} E_{sz}^* \right] e^{i\omega t} d\omega t_0 dz_0 dy, \quad (3)$$

де I_0 – постійна складова струму пучка; Δ – поперечний розмір пучка у напрямку вісі Oz ; L – довжина простору взаємодії.

Збудження нерезонансних систем відбувається подібно до збудження резонаторів. Різниця полягає лише в природі резонансу – він реалізується або в просторі (нерезонансний випадок), або в часі (резонансна система). Коефіцієнти розкладання поля через власні хвилі системи, що досліджується, задовольняють такому рівнянню збудження нерезонансних електродинамічних систем:

$$\frac{dC_s}{dy} = \frac{|I_0|}{\pi N_s \Delta} \int_0^{2\pi} \int_{\Delta} \left[E_{sy}^* + \frac{dz}{dy} E_{sz}^* \right] \exp(i\omega t) dz_0 d\omega t_0. \quad (4)$$

Рівняння збудження (3) та (4) отримані за допомогою асимптотичних методів теорії коливань і мають стандартну структуру, в якій можна виділити аналог середньої крутості вольтамперної характеристики активного елемента автогенератора. Це середня комплексна крутість коливальної характеристики, вираз для якої впливає з рівняння (3):

$$S(F_s) = \frac{1}{2\pi F_s \Delta} \int_0^1 \int_{\Delta} \int_0^{2\pi} \left[E_{sy}^* + \frac{dz}{dy} E_{sz}^* \right] e^{i\omega t} d\omega t_0 dz_0 dy, \quad (5)$$

де $F_s = \frac{C_s L}{U_0} = F \exp(-i\gamma)$ – нормована амплітуда коливань; U_0 – напруга, що прискорює електрони. Дійсна частина S_1 комплексної крутості визначає енергетичні характеристики електронно-хвильової системи: потужність, електронний ККД, пусковий струм; уявна S_2 – частотні характеристики.

У нерезонансній системі з рівняння (4) можна отримати вираз для комплексної диференціальної крутості коливальної характеристики:

$$S_d(y) = \frac{1}{F_s(y) \pi \Delta} \int_0^{2\pi} \int_{\Delta} \left[E_{sy}^* + \frac{dz}{dy} E_{sz}^* \right] e^{i\omega t} dz_0 d\omega t_0. \quad (6)$$

Важливою перевагою використання середньої комплексної крутості як базової характеристики резонансних систем є універсальність такого підходу, яка дозволяє визначати експлуатаційні характеристики, спираючись лише на інформацію про вид нелінійності електронно-хвильової системи. У цьому випадку значно спрощується порівняння теоретичних результатів та даних експериментів. На рис. 1 наведені результати розрахунку середньої крутості

амплітудної коливальної характеристики та відповідні дані експерименту, виконаного В. С. Мірошніченко, які позначені різними символами. Вимірювання проводилися в ІРЕ НАН України на макеті генератора дифракційного випромінювання 8-мм діапазону з потужністю $P = 1.27$ кВт; ККД $\eta = 18.7\%$. На рис. 1 наведені значення напруги, що прискорює електрони та відповідні значення параметра просторового розсинхронізму швидкостей електронів і сповільненої хвилі.

Основною енергетичною характеристикою неавтономних приладів є коефіцієнт підсилення K . Результати розрахунку значень K у децибелах наведені на рис. 2 разом з даними вимірювань (крапки) для двох значень потужності вхідного сигналу $P_0 = 1,0$ Вт и $P_0 = 31,4$ Вт. Експеримент проводився в імпульсному режимі із тривалістю імпульсу $\tau_u = 10$ мкс.

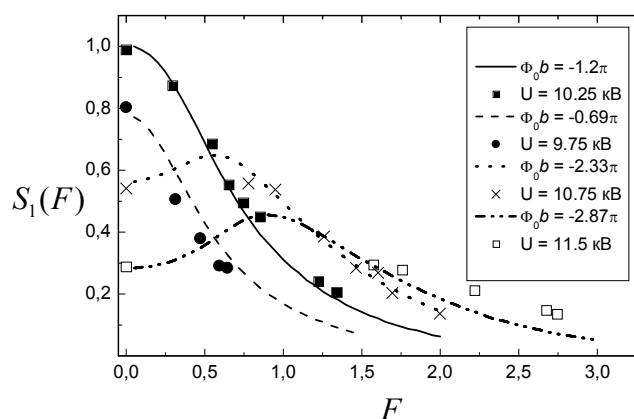


Рис. 1. Середня крутість амплітудної коливальної характеристики.

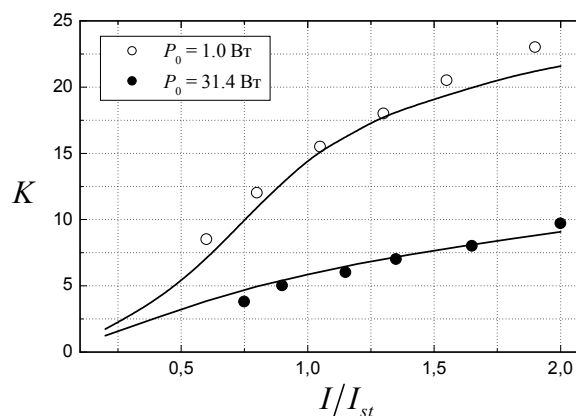


Рис. 2. Коефіцієнт підсилення як функція нормованого струму.

Із порівняння теоретичних та експериментальних результатів можна зробити висновок про їх задовільну відповідність для м'якого та жорсткого режиму збудження коливань, а також для режимів регенеративного підсилення та примусової синхронізації. Це свідчить про те, що обрана теоретична модель забезпечує необхідний рівень вірогідності результатів та адекватна фізичним процесам, що відбуваються в нелінійній електронно-хвильовій системі.

Третій розділ присвячений дослідженню багатовимірної релятивістської електронно-хвильової системи зі стрічковим електронним потоком. На базі нелінійної самоузгодженої теорії розглядаються закономірності взаємодії на різних стадіях розвитку коливального процесу.

Отримано тривимірну систему інтегро-диференціальних рівнянь для аналізу процесу збудження коливань у релятивістській системі з довільним просторовим розподілом індукції магнітостатичного поля. Аналітичні розв'язки цієї системи дозволяють визначити закономірності впливу різноманітних параметрів системи на її експлуатаційні характеристики.

На основі отриманих аналітичних розв'язків лінеаризованої системи рівнянь проведено розрахунки пускових характеристик релятивістської електронно-хвильової системи. На рис. 3 наведені залежності безрозмірного

пускового струму G_{st} від нормованої циклотронної частоти для різних значень релятивістського фактору γ_0 . Штрихові криві відповідають випадку урахування лише поздовжньої електронно-хвильової взаємодії, суцільні криві отримані під час урахування всіх доданків середньої комплексної крутості коливальної характеристики. Найсуттєвіші відмінності між цими кривими спостерігаються для відносно слабкого магнітостатичного поля $\left(\frac{\omega_c}{\omega} < 0.12\right)$, коли зростає вплив механізмів, обумовлених поперечним рухом електронів у просторі взаємодії.

Безвідносно до значення релятивістського фактору мінімальний пусковий струм реалізується для значення нормованої циклотронної частоти, що відповідає умові синхронізму просторової гармоніки поля з повільною циклотронною хвилею. Існування мінімуму в залежностях $G_{st}\left(\frac{\omega_c}{\omega}\right)$ обумовлене впливом двох протидіючих механізмів – поперечним групуванням електронів та осіданням частини електронного потоку на поверхню електродинамічної системи.

Результати розрахунків свідчать про те, що вплив ефектів, обумовлених поперечними зсувами траєкторій електронів, на ефективність енергообміну в системі стає більш суттєвим із збільшенням значення релятивістського фактору. Таким чином, за умови кінцевого значення індукції магнітостатичного поля, що фокусує електронний потік, для вірогідного аналізу процесу збудження коливань у релятивістській системі необхідно використовувати багатовимірні моделі електронно-хвильової взаємодії.

Цей висновок підтверджується результатами багатовимірного моделювання нелінійного процесу взаємодії стрічкового електронного потоку з електромагнітним полем резонансної електродинамічної системи для значення нормованої циклотронної частоти $\frac{\omega_c}{\omega} = 0.1$. На рис. 4 подані залежності електронного ККД η , що характеризує ефективність взаємодії, та електронного зсуву частоти $\delta\omega$ від параметра просторового розсинхронізму швидкостей електронів та сповільненої хвилі. Графіки побудовані для різних значень релятивістського фактору і відповідають випадкам фіксованого робочого струму пучка (рис. 4,а) та фіксованого відношення робочого струму до мінімального пускового (рис. 4, б).

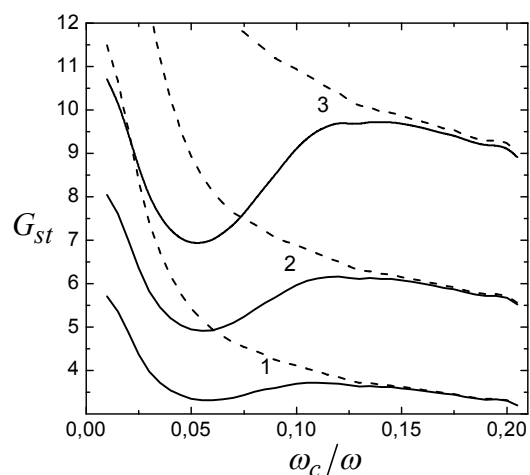


Рис. 3. Залежності пускового струму від нормованої циклотронної частоти.

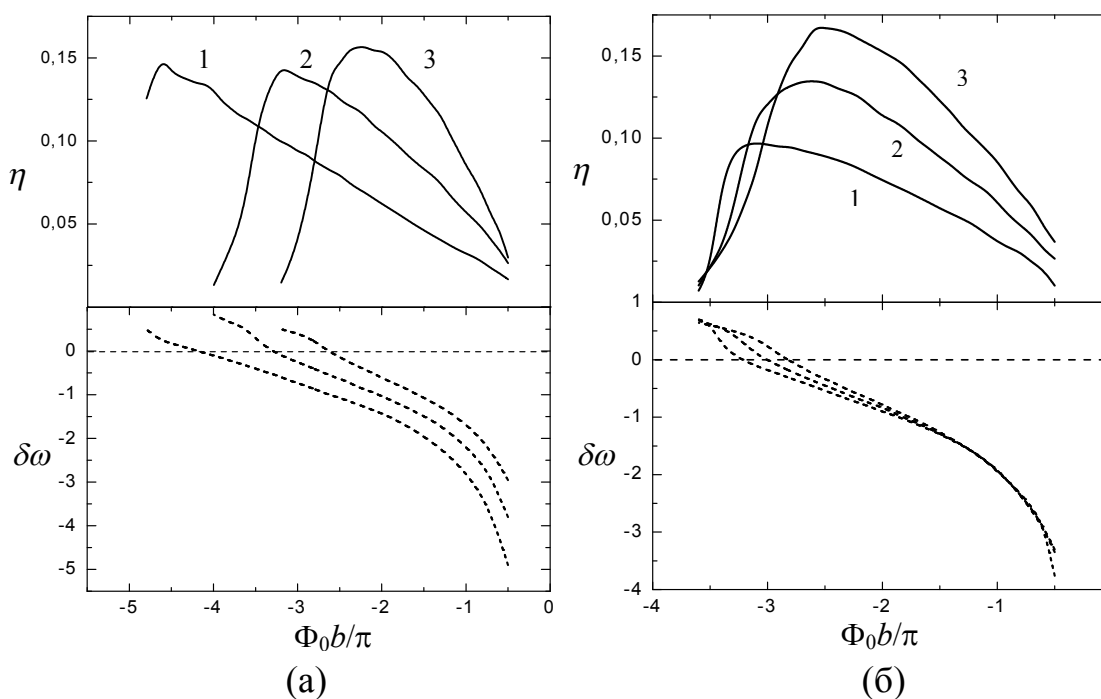


Рис. 4. Електронний ККД та зсув частоти для $\frac{\omega_c}{\omega} = 0.1$.

$$1 - \gamma_0 = 1.01; 2 - \gamma_0 = 1.3; 3 - \gamma_0 = 1.6.$$

У першому випадку збільшення γ_0 призводить до зсуву максимуму зони генерації уздовж вісі абсцис без помітної зміни його значення. Внаслідок зменшується ширина зони генерації. У другому випадку ширина незмінна, але максимальне за зоною значення електронного ККД збільшується, що свідчить про компенсацію негативного впливу струмоосідання за рахунок підвищення загальної кількості електронів у просторі взаємодії.

Характерною рисою відзначених залежностей є відсутність коливального гістерезису. Оскільки коливальний гістерезис пов'язаний із співвідношенням між кількістю захоплених та пролітних заряджених часток, то можна зробити висновок про переважне осідання захоплених полем електронів, для яких динамічні поперечні зсуви траєкторій більш суттєві порівняно із пролітними.

Проведені дослідження залежностей максимального за зоною генерації електронного ККД від нормованого струму пучка також свідчать про важливу роль багатовимірних ефектів у релятивістських електронно-хвильових системах при кінцевих значеннях індукції магнітостатичного поля (рис. 5). Зі збільшенням релятивістського фактору відбувається зменшення темпу групування потоку через збільшення ефективної маси електронів. Осідання частини електронного потоку на поверхню електродинамічної системи відбувається в умовах, коли переважна частина електронів віддає енергію височастотному полю. Тому при збільшенні параметра γ_0 спостерігається зменшення ефективності взаємодії практично для всіх розглянутих значень струму пучка.

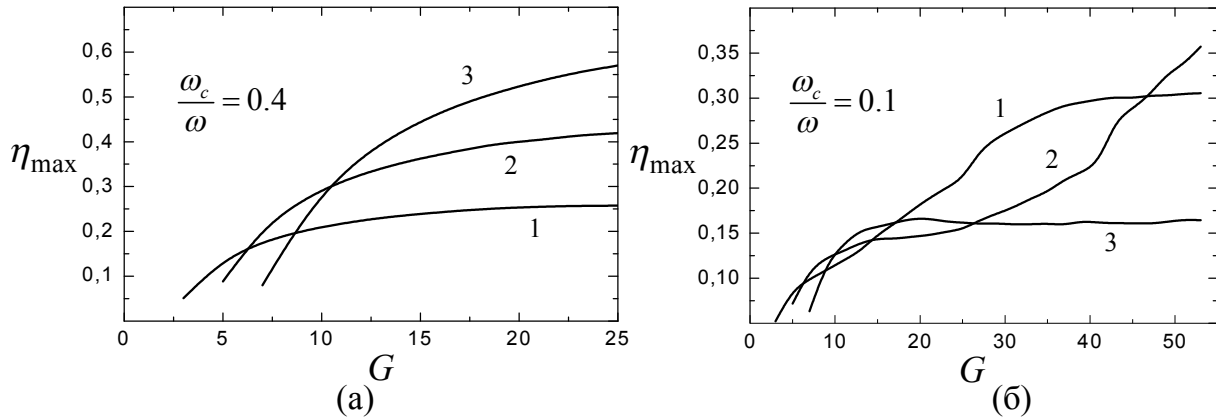


Рис. 5. Залежності максимального електронного ККД від нормованого струму.
1 – $\gamma_0 = 1.01$; 2 – $\gamma_0 = 1.3$; 3 – $\gamma_0 = 1.6$.

Таким чином, позитивний вплив струмоосідання на ефективність взаємодії в нерелятивістських системах, обумовлений фазовим сортуванням електронів, змінюється негативним при збільшенні релятивістського фактора.

У четвертому розділі досліджуються основні закономірності багатовимірної електронно-хвильової взаємодії в нерезонансних каскадах комбінованих систем. Отримано систему рівнянь, що описує процес енергообміну між стрічковим електронним потоком та електромагнітним полем нерезонансної електродинамічної системи. В загальному випадку простір взаємодії вважається секціонованим з довільним розташуванням імпедансної поверхні в різних секціях системи.

У комбінованих електронно-хвильових системах нерезонансні ділянки простору взаємодії можуть виконувати функції модуляторів електронного потоку та широкосмугових підсилювачів вхідних сигналів. Тому багатовимірна модель системи враховує різноманітні способи подачі вхідного сигналу: безпосередньо у простір взаємодії та через попередню модуляцію електронного потоку.

Моделювання комбінованої схеми з резонансним модулятором та нерезонансним кінцевим каскадом дозволило визначити значення потужності вхідного сигналу і відносного розсинхронізму швидкостей електронів та сповільненої хвилі, що забезпечують максимальні значення коефіцієнта підсилення та електронного ККД.

На рис. 6 наведені результати розрахунку коефіцієнта підсилення та електронного ККД у секціонованому нерезонансному каскаді комбінованої системи. Потужність вхідного сигналу P_0 та параметр розсинхронізму $\Phi_0 b$ відповідають максимальній ефективності взаємодії в нерезонансному каскаді без поділу на секції. Параметр $\hat{\xi}$ визначає поздовжню координату розриву простору взаємодії, після якого змінюється розташування імпедансної поверхні в нерезонансній електродинамічній системі. Значення $\hat{\xi} = 0$ відповідає схемі,

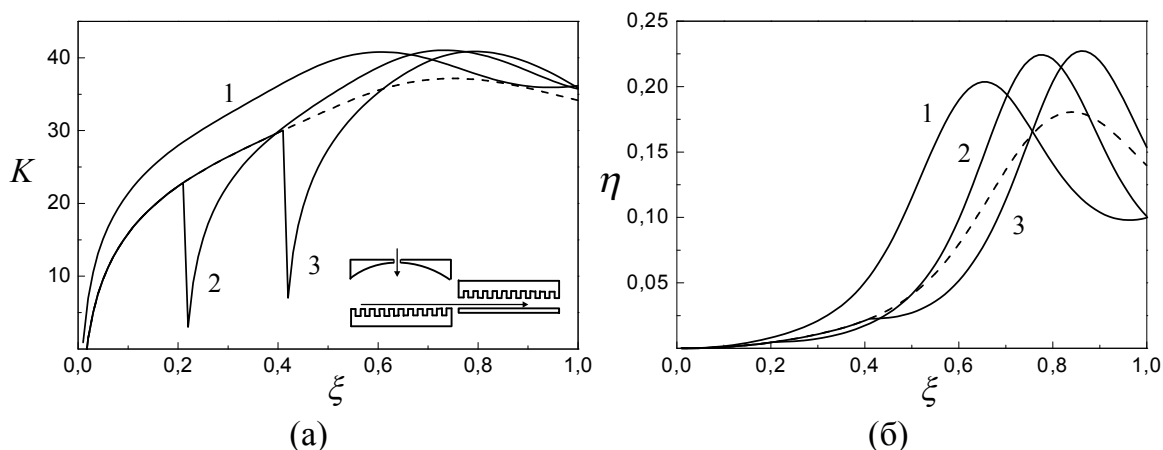


Рис. 6. Залежності коефіцієнту підсилення та електронного ККД від нормованої поздовжньої координати.

1. $\hat{\xi} = 0$; 2. $\hat{\xi} = 0.2$; 3. $\hat{\xi} = 0.4$.

яка зображена на рис. 6,а. Штрихові криві розраховувалися для системи без розривів простору взаємодії ($\hat{\xi} = 1$).

Застосування секціонованої електродинамічної системи дозволяє підвищити коефіцієнт підсилення та електронний ККД для всіх розглянутих значень нормованої координати $\hat{\xi}$. Основною причиною підвищення ефективності електронно-хвильової системи в цьому випадку є вирівнювання умов взаємодії в перетині електронного потоку за рахунок інвертованого розташування імпедансної поверхні на різних ділянках секціонованого простору взаємодії.

Іншим способом компенсації високочастотного розшарування в багатовимірних системах є формування визначеного розподілу початкових швидкостей парціальних пучків багатопарального електронного потоку. Розглянуто випадок лінійного закону зміни швидкостей, коли різниця відносного розсинхронізму суміжних парціальних потоків Φ_{Δ} є сталою величиною.

На рис. 7 наведені залежності коефіцієнта підсилення в децибелах від нормованої поздовжньої координати для різних значень параметра Φ_{Δ} . Штрихова крива відповідає випадку моношвидкісного потоку. Збільшення значення Φ_{Δ} супроводжується значним підвищенням ефективності взаємодії – на виході системи коефіцієнт

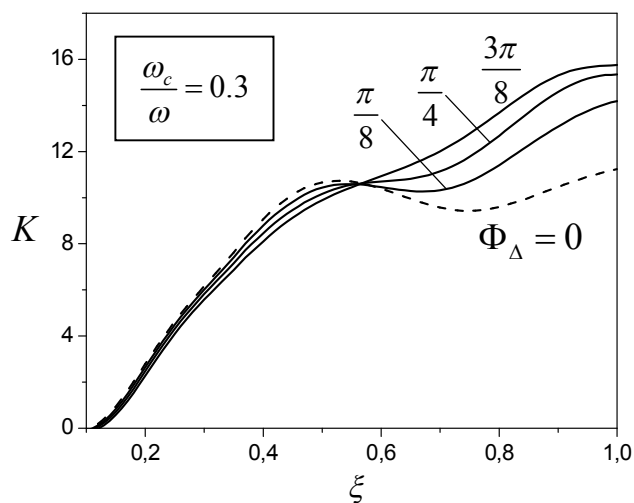


Рис. 7. Коефіцієнт підсилення системи з багатопаральним електронним потоком.

підсилення збільшується майже в 1.5 рази. В цьому випадку просторовий розподіл модуля високочастотного струму найбільш суттєво змінюється для зовнішніх парціальних потоків, віддалених від імпедансної поверхні. Цей ефект обумовлений зменшенням кількості електронів, що осідають на поверхню електродинамічної системи.

Використання нахилу електронного потоку до імпедансної поверхні є одним з найбільш перспективних шляхів підвищення ефективності резонансних та нерезонансних приладів мм- та субмм-діапазону. Істотна відмінність нерезонансних систем від звичайних клінотронів полягає в формуванні амплітудного розподілу поля в процесі самоузгодженої електронно-хвильової взаємодії. На рис. 8 наведені результати розрахунку коефіцієнта підсилення для різних значень потужності вхідного сигналу та кута нахилу χ . Передбачається, що сигнал подається безпосередньо у простір взаємодії.

У випадку відносно слабкого вхідного сигналу нахил силових ліній магнітостатичного поля призводить до підвищення коефіцієнта підсилення через розташування електронного потоку в області максимальної інтенсивності високочастотного поля поблизу імпедансної поверхні (рис. 8, а). Горизонтальні ділянки кривих на рис. 8 відповідають осіданню всього електронного потоку, тобто перехоплення електронів поверхнею електродинамічної системи являє собою механізм обмеження зростання ефективності взаємодії. Аналогічний висновок можна зробити для системи з більш потужним вхідним сигналом (рис. 8, б). У цьому випадку максимальний коефіцієнт підсилення реалізується для $\chi = -25'$, коли відсутнє повне осідання електронного потоку для обраного значення прицільної відстані.

Струмоосідання виникає не тільки через нахил силових ліній магнітостатичного поля, а і внаслідок статичних і динамічних поперечних зсувів траєкторій електронів. Тому під час моделювання нерезонансного підсилювача розглядалися різні значення нормованої циклотронної частоти, які безпосередньо визначають індукцію поля, що фокусує електронний потік (рис. 9). В залежності від потужності вхідного сигналу та параметрів електронно-оптичної системи можливі різні наслідки нахилу силових ліній

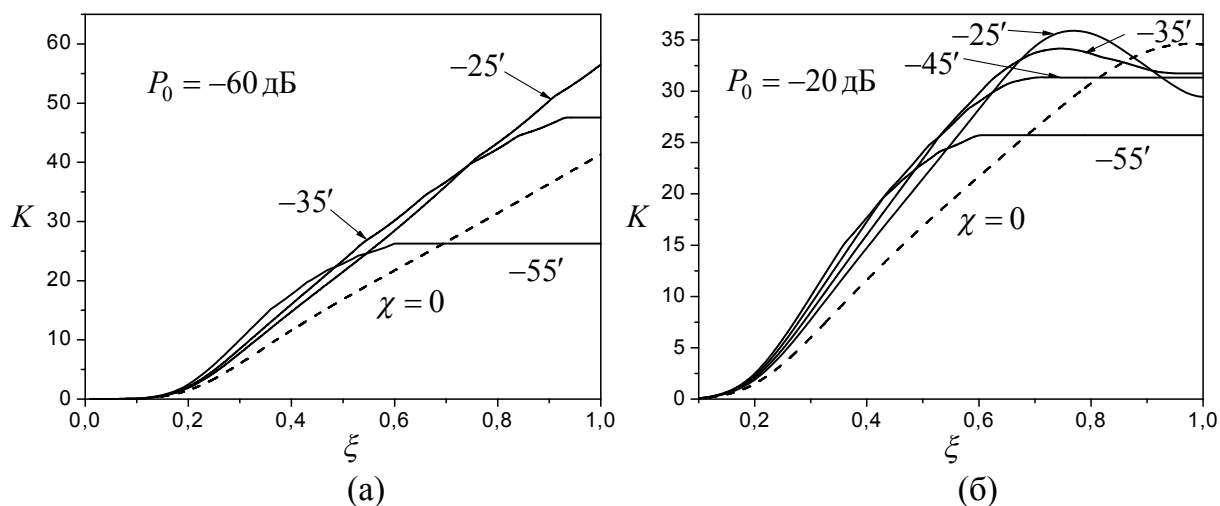


Рис. 8. Коефіцієнт підсилення системи з нахилом магнітостатичного поля.

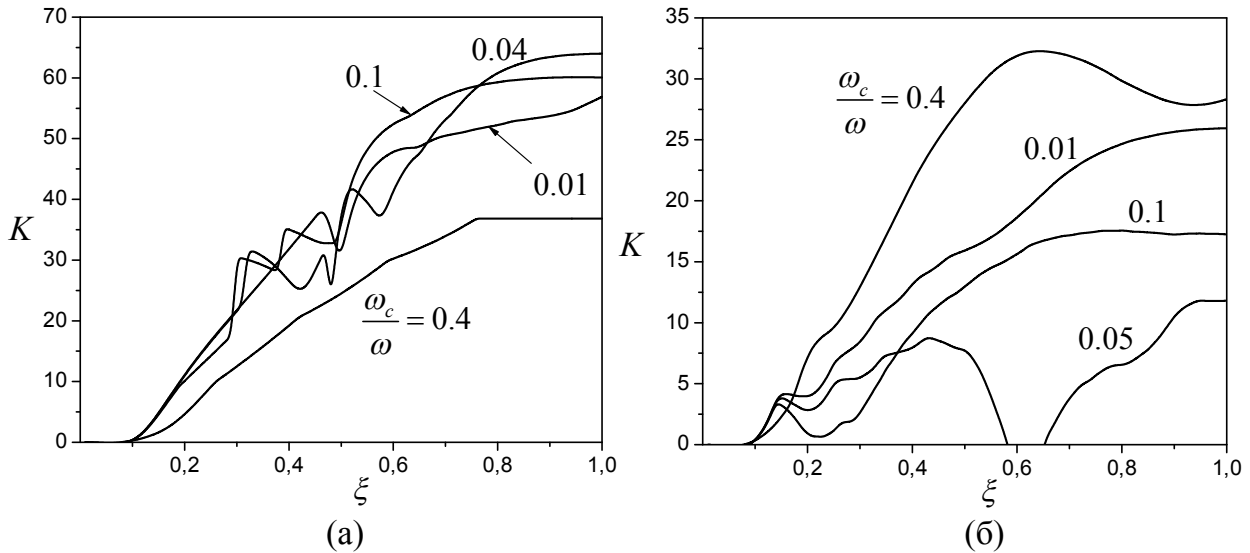


Рис. 9. Коефіцієнт підсилення для різних значень потужності вхідного сигналу.

(а) – $P_0 = -60$ дБ; $\chi = -20'$. (б) – $P_0 = -20$ дБ; $\chi = -10'$.

магнітостатичного поля. На рис. 9,а зменшення нормованої циклотронної частоти супроводжується зростанням коефіцієнта підсилення, а на рис. 9,б – зменшенням K . Фізичні причини таких результатів обумовлюються розподілом повного струму пучка в просторі взаємодії.

У п'ятому розділі досліджуються закономірності впливу зовнішніх сигналів на резонансні електронно-хвильові системи. Розглянуто декілька варіантів зовнішнього впливу: силовий за умови подачі високочастотного сигналу безпосередньо в простір взаємодії та низькочастотний параметричний через модуляцію просторового розподілу неоднорідного магнітостатичного поля.

Наявність локальної неоднорідності магнітного поля в просторі взаємодії неавтономної коливальної системи дозволяє не тільки підвищити її ефективність, а й керувати стаціонарними та нестаціонарними характеристиками. Рівняння для амплітудної та фазової резонансних характеристик випливають зі стаціонарних рівнянь збудження і мають такий вигляд:

$$[1 - GS_1(F)]^2 + [\delta\omega + GS_2(F)]^2 = \frac{a^2}{F^2}, \quad (7)$$

$$\gamma = \arctg \left[\frac{\delta\omega + GS_2(F)}{1 - GS_1(F)/F} \right], \quad (8)$$

де a – амплітуда зовнішнього сигналу; S_1 та S_2 – середні крутості амплітудної та частотної коливальної характеристики. Для визначення стійкості стаціонарних коливань використовується критерій Рауса-Гурвіца, параметри якого визначаються через компоненти середньої комплексної крутості коливальної характеристики:

$$p = \frac{\partial}{\partial F} F^2 (1 - GS_1(F)), \quad (9)$$

$$\hat{q} = \frac{\partial}{\partial F} F^2 \left((1 - GS_1(F))^2 + (\delta\omega + GS_2(F))^2 \right). \quad (10)$$

Параметри p і \hat{q} визначають амплітудну і фазову стійкість коливань. За умови $p > 0$, $\hat{q} > 0$ розв'язки стаціонарних рівнянь збудження вважаються стійкими.

З рівнянь (7)-(10) можна зробити висновок про керування резонансними характеристиками як за формою, так і за розподілом стійких і нестійких стаціонарних значень амплітуди коливань, через зміну параметрів локальної неоднорідності поля, що фокусує електронний потік. Розглянуто два параметри магнітної неоднорідності: амплітуда a_M та поздовжня координата ξ_M її центру в просторі взаємодії. На рис. 10 подані результати розрахунків резонансних характеристик для різних значень параметрів a_M та ξ_M . Суцільні криві показують стійкі значення амплітуди коливань, штрихові – нестійкі. Зсув локальної магнітної неоднорідності уздовж простору взаємодії супроводжується зміною амплітуди коливань, ширини смуги синхронізації і взагалі режиму неавтономної системи. Примусова синхронізація змінюється на регенеративне підсилення. Значення $a_M = -0.3$ (рис. 10,б) відповідає ситуації, коли електронний потік повністю осідає на поверхню електродинамічної системи. В цьому випадку спостерігаються резонансні характеристики, в яких відсутні замкнені частини, але максимальна амплітуда коливань майже не змінюється порівняно із випадком $a_M = -0.2$ (рис. 10,а), коли відбувається часткове струмоосідання.

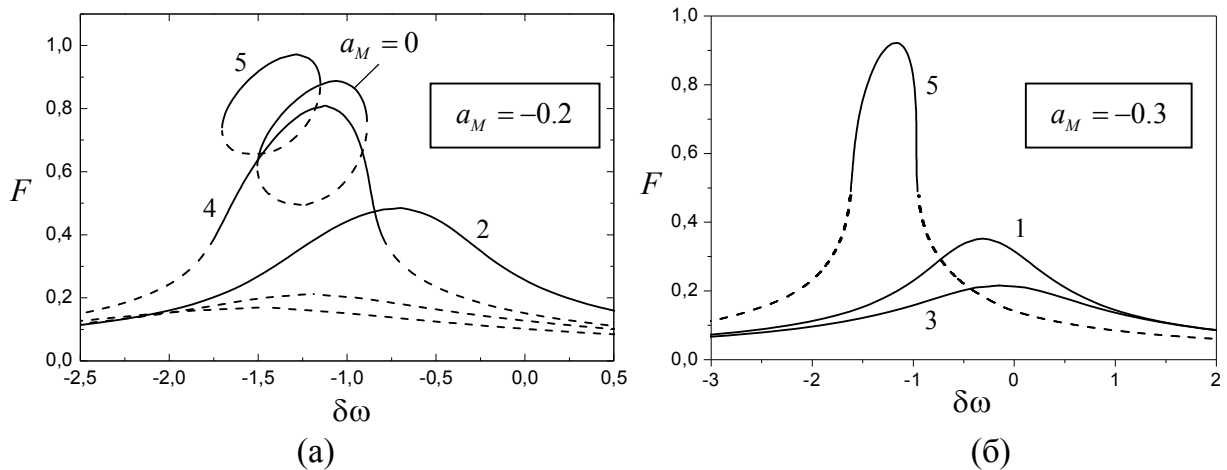


Рис. 10. Резонансні характеристики неавтономної системи.

1 – $\xi_M = 0.2$; 2 – 0.4; 3 – 0.5; 4 – 0.6; 5 – 0.8.

Для фіксованого значення частотного параметра $\delta\omega$ зсув магнітної неоднорідності дозволяє змінювати стан коливань у системі від стійких до нестійких і навпаки. Це ілюструється на рис. 11, де подані залежності

амплітуди коливань від нормованого часу для чотирьох різних положень локальної неоднорідності магнітостатичного поля в просторі взаємодії.

Збільшення параметра ξ_M з 0.6 до 0.8 супроводжується переходом від стійких коливань до режиму биттів через проміжні реалізації нестационарних процесів, які відповідають переходу до смуги синхронізації з боку амплітудної нестійкості коливань. Встановлені закономірності впливу

неоднорідності магнітостатичного поля на характеристики електронно-хвильової системи дозволяють зробити висновок щодо можливості реалізації системи керування приладами через модуляцію параметрів неоднорідності поля, що фокусує електронний потік. Найбільш простим для практичної реалізації є варіант модуляції через зміну амплітуди магнітної неоднорідності a_M .

У роботі розглянуто випадок адіабатичної зміни параметра a_M , коли період модуляції набагато більший за час встановлення стаціонарної амплітуди коливань в автономному генераторі. На рис. 12 наведено декілька реалізацій часових залежностей амплітуди коливань для різних значень параметрів магнітної неоднорідності. Суцільними кривими показані значення амплітуди високочастотних коливань, а штриховими – значення параметра a_M .

На рис. 12,а амплітуда магнітної неоднорідності змінюється в інтервалі значень $(-0.05, 0.05)$. У цьому випадку реалізується імпульсна часова залежність амплітуди коливань. Зрив коливань спостерігається для максимальних додатних значень параметра a_M , коли траєкторії електронів віддаляються від поверхні електродинамічної системи на початку простору взаємодії.

Зсув центру магнітної неоднорідності до середини простору взаємодії та збільшення інтервалу значень параметра a_M до $(-0.25, 0.25)$ призводять також

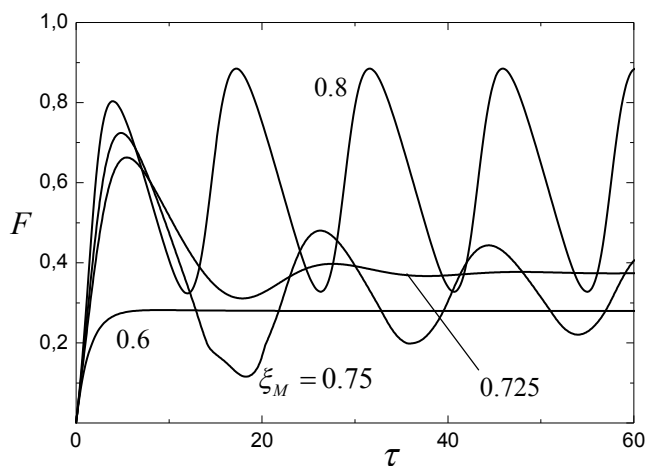


Рис. 11. Часові залежності амплітуди коливань.
 $a_M = -0.3$; $\delta\omega = -0.5$.

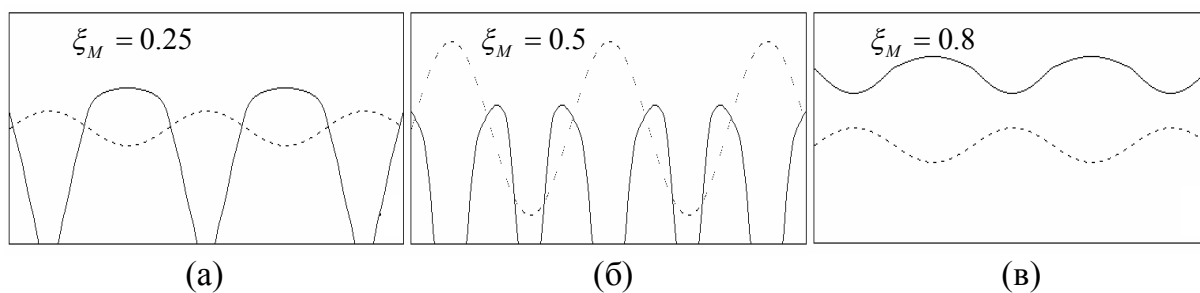


Рис. 12. Залежності амплітуди сигналу від нормованого часу для різних значень параметрів магнітної неоднорідності.

до імпульсної часової залежності амплітуди коливань з подвійною частотою прямування (рис. 12,б). Зриви генерації спостерігаються для максимальних абсолютних значень амплітуди магнітної неоднорідності, коли відбувається збільшення пускового струму через осідання електронів на поверхню електродинамічної системи або віддалення від неї. На рис. 12,в часові залежності амплітуди коливань подібні до закону зміни параметра a_M . В цьому випадку амплітуда магнітної неоднорідності змінюється в інтервалі $(-0.1, 0)$.

У шостому розділі досліджується комбінована електронно-хвильова система, що складається з двох каскадів із різними видами взаємодії. Перший каскад поєднує функції нерезонансного модулятора електронного потоку та широкопугового підсилювача. Вихідний резонансний каскад є коливальною системою із зовнішнім параметричним впливом у вигляді попередньої модуляції електронного потоку.

Для запису рівнянь збудження резонансних і нерезонансних каскадів використовуються вирази для середньої комплексної крутості коливальної характеристики (5) та диференційної крутості (6):

$$\frac{d\hat{F}}{d\tau} + [1 - i\delta\omega - GS]\hat{F} = 0, \quad (11)$$

$$\frac{d\hat{F}}{d\xi} + [d + i\Phi_0 b - \hat{G}S_d]\hat{F} = 0, \quad (12)$$

де $\hat{F}(\xi) = F(\xi)\exp(-i\gamma)$; F та γ – амплітуда та фаза коливань; τ – нормований час; $\xi = \frac{y}{L}$ – безрозмірна поздовжня координата; d – параметр загасання; $\delta\omega$ – електронний зсув частоти; G та \hat{G} – параметри ефективності взаємодії для резонансного та нерезонансного каскаду відповідно; $\Phi_0 b$ – параметр просторового розсинхронізму швидкостей електронів v_e та фазової швидкості сповільненої хвилі v_φ ; $b = 1 - v_e/v_\varphi$; Φ_0 – статичний кут прольоту електроном простору взаємодії. На прикладі рівнянь (11) та (12) видно прояв відомого принципу просторово-часової аналогії, згідно з яким нерезонансним хвильовим системам можна поставити у відповідність резонансні коливальні системи. Умова підсилення $\hat{G}S_d > d$ відповідає умові збудження коливань $GS > 1$. Встановлення амплітуди коливань в одному випадку відбувається при зміні «повільного» часу τ , а в іншому – при зміні поздовжньої координати ξ .

Таким чином, аналіз фізичних процесів у комбінованій електронно-хвильовій системі можна проводити з однакових позицій для різних ділянок простору взаємодії. Більш того, зазначена аналогія дозволяє виявляти нові закономірності процесу електронно-хвильової взаємодії визначеного типу на основі аналізу закономірностей, притаманних іншому типу взаємодії.

Середня комплексна крутість коливальної характеристики неавтономної системи визначається не лише амплітудою, а й фазою коливань. На рис. 13

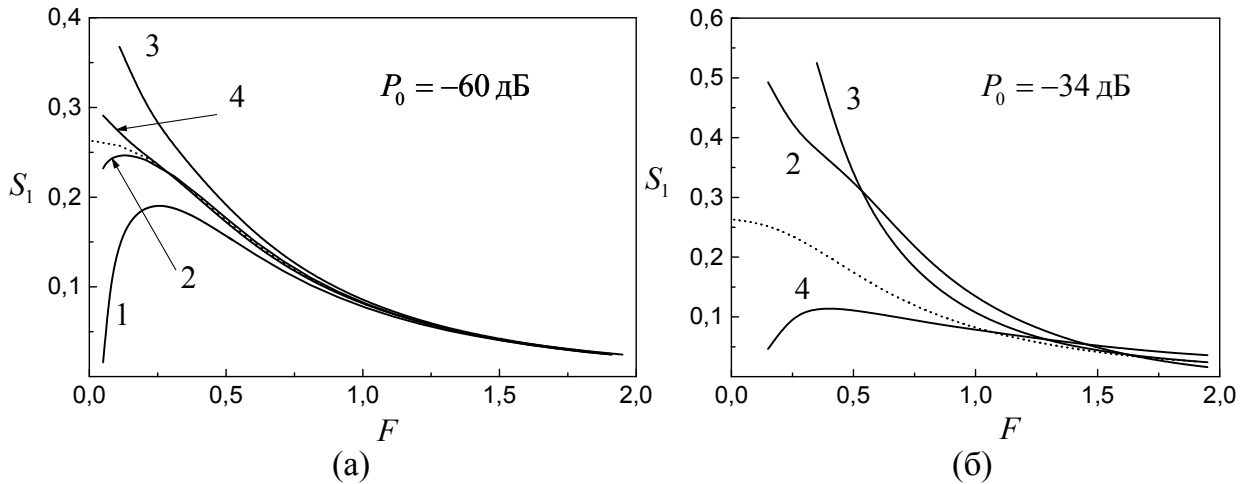


Рис. 13. Середня крутість амплітудної коливальної характеристики для різних значень параметрів комбінованої системи:
1. $\gamma = 0$; 2. 0.5π ; 3. π ; 4. 1.5π .

подані залежності середньої крутості амплітудної коливальної характеристики від амплітуди коливань для різних значень потужності вхідного сигналу та фази γ . Пунктирні криві розраховані для автономної коливальної системи. Найбільш суттєвий вплив зовнішнього сигналу на середню крутість спостерігається для відносно невеликих значень стаціонарної амплітуди коливань F . У цьому випадку закономірності групування електронного потоку переважно визначаються характеристиками модулятора. З підвищенням амплітуди коливань визначальним фактором фазування електронів стає високочастотне поле резонансної коливальної системи, просторова структура якого практично однакова для автономного та неавтономного режимів.

Розв'язки стаціонарних рівнянь збудження відносно амплітуди та фази коливань у резонансній електронно-хвильовій системі зручно аналізувати на площині (γ, F) . На рис. 14 такі розв'язки подано у вигляді ізоліній рівних

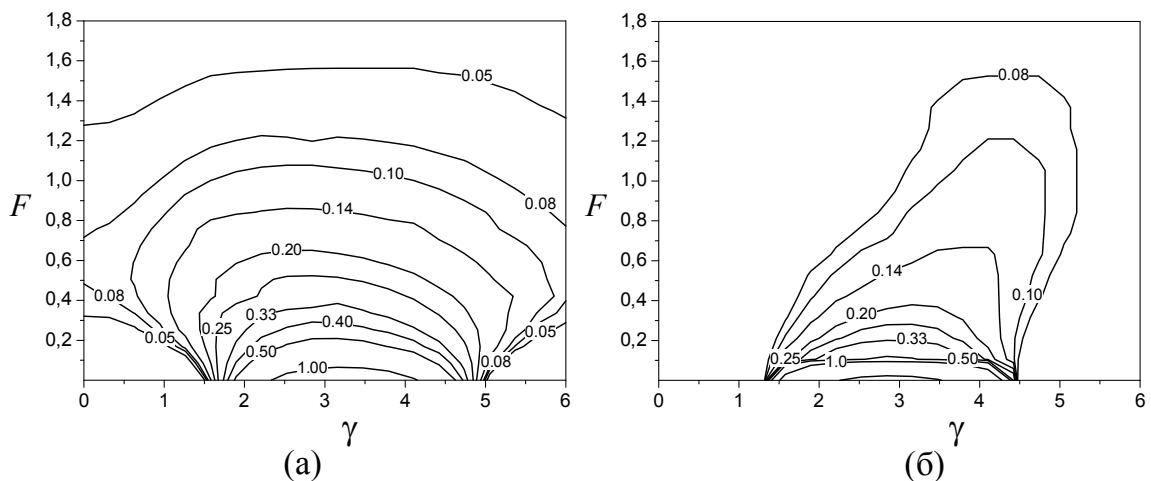


Рис. 14. Стаціонарні значення амплітуди і фази коливань.
(а) $\Phi_0 b = -\pi$; (б) $\Phi_0 b = -2\pi$.

значень параметра G^{-1} , які наведені на відповідних кривих. У випадку відносно слабких вхідних сигналів ($P_0 = -46$ дБ, рис. 14,а) і невеликих значень параметра ефективності взаємодії G стаціонарні розв'язки рівнянь збудження існують лише у визначених діапазонах зміни фази γ . Із збільшенням параметра G формується додаткова гілка залежності $F(\gamma)$, яка охоплює всі можливі значення фази коливань у резонансній системі.

Підвищення потужності вхідного сигналу призводить до обмеження діапазону значень фази коливань, де існують розв'язки рівнянь збудження для всіх розглянутих значень параметра ефективності взаємодії ($P_0 = -26$ дБ, рис. 14,б). У цьому випадку реалізується лише одна гілка розв'язків.

На рис. 15 зображені результати розрахунків резонансних характеристик для різних значень потужності вхідного сигналу. Рис. 15,а відповідає м'якому режиму збудження коливань, рис. 15,б – жорсткому. Суцільними кривими показані стійкі значення амплітуди вимушених коливань, штриховими – нестійкі. Штрих-пунктиром позначені криві точного резонансу, які відповідають автономній коливальній системі. Слід зазначити, що збільшення потужності вхідного сигналу призводить до зсуву максимуму резонансних характеристик від кривих точного резонансу. Це обумовлено залежністю середньої крутості коливальної характеристики від амплітуди і фази коливань.

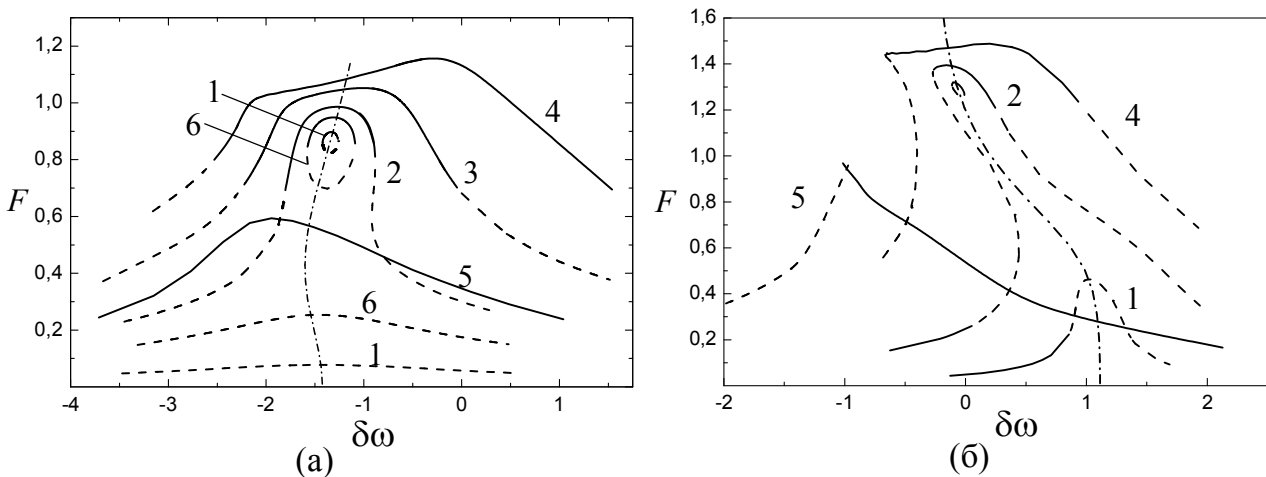


Рис. 15. Резонансні характеристики вихідного каскаду для різних значень потужності вхідного сигналу:

1. $P_0 = -30$ дБ; 2. -23 дБ; 3. -20 дБ; 4. -17 дБ; 5. -13 дБ; 6. -25 дБ.

Для розрахунку нестационарних характеристик резонансного каскаду комбінованого приладу проводилося чисельне розв'язання рівняння збудження (11) з урахуванням залежності середньої комплексної крутості коливальної характеристики від амплітуди та фази коливань. Внаслідок цього були отримані часові реалізації перехідних процесів, фазові портрети та спектри коливань.

На рис. 16 ці характеристики наведені для м'якого режиму збудження коливань. У цьому випадку реалізується характерна трикутна форма спектра з максимумом на частоті зовнішнього впливу і фазова траєкторія еліптичної

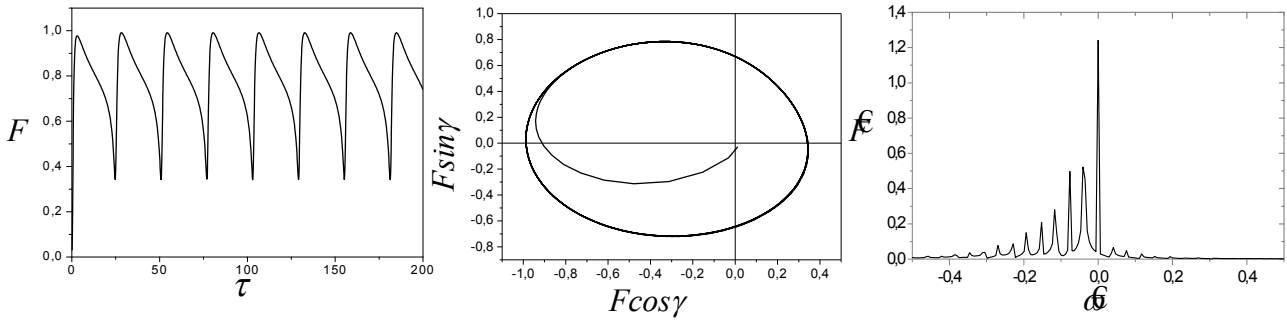


Рис. 16. Нестационарні характеристики неавтономної системи з попередньою модуляцією електронного потоку:
 $P_0 = -23$ дБ; $\delta\omega = -0.8$

форми, що охоплює центр координат. Дані ознаки дозволяють визначити цей режим як биття з боку фазової нестійкості коливань.

У цьому розділі досліджуються закономірності помноження частоти в комбінованій двокаскадній електронно-хвильовій системі з урахуванням багатовимірних ефектів. Розглянуто варіант нерезонансного модулятора і резонансного вихідного каскаду.

Результати розрахунків середньої крутості амплітудної коливальної характеристики наведені на рис. 17 для м'якого та жорсткого режимів збудження коливань у резонансному каскаді (рис. 17,а і б відповідно). Номери на кривих показують значення коефіцієнта помноження частоти n . Амплітудні залежності середньої крутості розраховувалися для фіксованих значень фази коливань γ , які відповідають максимальній вихідній потужності.

Збільшення коефіцієнта помноження частоти призводить до зменшення середньої крутості амплітудної коливальної характеристики для всіх розглянутих значень амплітуди коливань F . Отже, відповідно знижується ефективність електронно-хвильової взаємодії, що найбільш суттєво відбувається для відносно невеликих значень F . Це свідчить про збільшення

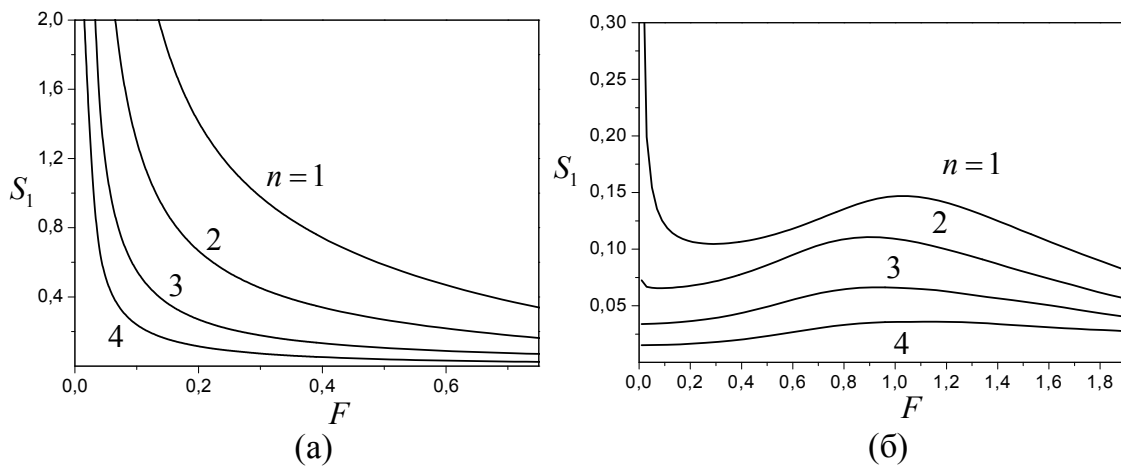


Рис. 17. Середня крутість амплітудної коливальної характеристики для різних значень коефіцієнту помноження частоти. $P_0 = -60$ дБ.

пускового струму для резонансного каскаду під час роботи на вищих гармоніках частоти вхідного сигналу.

Визначення стаціонарних значень амплітуди і фази коливань здійснюється через розв'язання системи рівнянь збудження резонансної системи модульованим електронним потоком.

Збільшення потужності вхідного сигналу призводить до значного зменшення ефективності помноження частоти. Зокрема, для значення $P_0 = -20$ дБ відбувається зменшення амплітуди коливань на другій гармоніці частоти вхідного сигналу в декілька разів порівняно із випадком $P_0 = -26$ дБ. Фізичні причини цього явища обумовлені особливостями групування електронів у нерезонансному модуляторі. Для підвищення ефективності помножувача в такій ситуації можна, наприклад, використовувати резонатор з максимумом амплітудного розподілу високочастотного поля на початку простору взаємодії (резонансна ЛЗХ), або зменшувати довжину модулятора. Результати проведених розрахунків підтверджують такі припущення. На рис. 18 зображені залежності максимальної амплітуди вихідного сигналу від коефіцієнта помноження частоти для різних значень відношення робочого струму пучка до мінімального пускового струму I/I_{st} . Наведені дані для двох значень нормованої довжини модулятора:

$L_M/L = 1$ та $L_M/L = 0.7$. Вкорочення модулятора дозволяє в декілька разів підвищити амплітуду сигналу на виході помножувача частоти для всіх розглянутих значень коефіцієнта n . Слід зазначити, що для значень $n > 4$ на виході комбінованої системи з $L_M/L = 1$ коливання взагалі не збуджуються, тобто у даному випадку вкорочення модулятора дозволяє зменшити пусковий струм резонансного каскаду.

Застосування просторово-розвинутих електронних потоків є одним з найбільш ефективних засобів підвищення ефективності електронно-хвильових систем мм- та субмм-діапазону. В роботі досліджується комбінований помножувач частоти з багат шаровим електронним потоком, в якому парціальні пучки мають різні початкові поздовжні швидкості. Розглянуто випадок лінійного зменшення швидкості пучків при віддаленні від поверхні системи, що сповільнює. Це дозволяє частково компенсувати високочастотне розшарування електронного потоку і підвищити ефективність електронно-хвильової взаємодії.

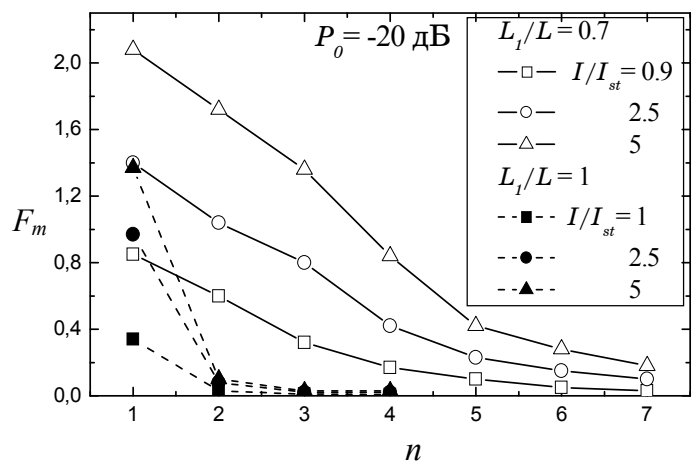


Рис. 18. Залежності максимальної амплітуди сигналу від коефіцієнта помноження частоти.

Для чисельних розрахунків використовується різниця параметрів просторового розсинхронізму сусідніх парціальних пучків $\Phi_{\Delta} = \Phi_0(b_{i+1} - b_i)$, де i – номер, який відлічується від найближчого до електродинамічної системи пучка.

На рис. 19 подано результати розрахунків максимальної амплітуди коливань на 4-й гармоніці частоти вхідного сигналу як функції Φ_{Δ} для різних значень відношення робочого струму пучка до мінімального пускового. На рис. 19,а потужність вхідного сигналу $P_0 = -26$ дБ, що відповідає максимальній потужності коливань у резонансному каскаді помножувача частоти у випадку моношвидкісного електронного потоку. В режимі примусової синхронізації вибір значення параметра Φ_{Δ} дозволяє майже вдвічі збільшити амплітуду коливань. Крім того, оптимальне значення різниці розсинхронізмів сусідніх парціальних пучків не залежить від параметра I/I_{st} і складає $\Phi_{\Delta} \approx 0.8\pi$. Графіки на рис. 19,б побудовані для значення $P_0 = -20$ дБ, коли у випадку моношвидкісного електронного потоку коливання на 4-й гармоніці частоти вхідного сигналу взагалі не збуджуються. Очевидно, що через вибір розподілу початкових швидкостей парціальних пучків здійснюється збудження коливань у резонансному каскаді помножувача для всіх розглянутих значень параметра I/I_{st} . Результати чисельного аналізу мікропроцесів свідчать про те, що основною фізичною причиною відзначених явищ є часткова компенсація високочастотного розшарування електронного потоку в процесі багатовимірної електронно-хвильової взаємодії.

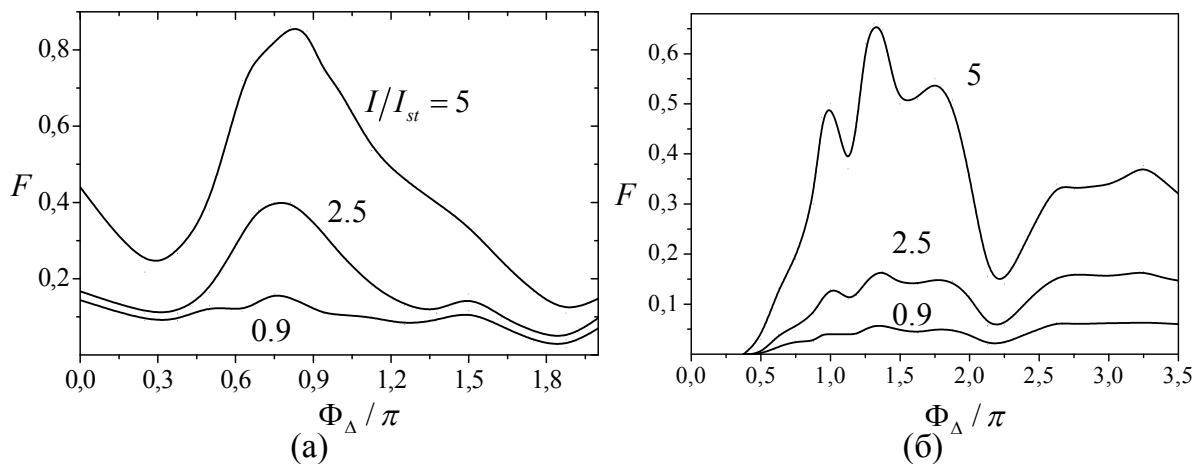


Рис. 19. Залежності максимальної амплітуди сигналу від різниці розсинхронізмів парціальних пучків. $\Phi_0 b_1 = -3\pi$.

Розглянемо комбінований помножувач частоти, в якому фокусування електронного потоку здійснюється магнітостатичним полем із скінченним значенням індукції. При чисельних розрахунках параметри електронно-хвильової системи підбиралися так, щоб забезпечити для випадку жорсткого фокусування максимальне значення коефіцієнта перетворення частоти

$K_f = 20 \lg(F_n/F_0)$, де F_n – амплітуда сигналу на n -й гармоніці частоти вхідного сигналу; F_0 – амплітуда вхідного сигналу.

Результати розрахунків залежностей коефіцієнта перетворення від нормованої циклотронної частоти на 4-й гармоніці частоти вхідного сигналу представлені на рис. 20. Штриховими лініями показані значення коефіцієнта K_f для випадку жорсткого фокусування, коли можна не враховувати поперечні зсуви траєкторій електронів у просторі взаємодії. За цих умов максимальний коефіцієнт перетворення реалізується для значення $P_0 = -26$ дБ. Залежності $K_f(\omega_c/\omega)$ мають виражений максимум для всіх розглянутих значень параметра I/I_{st} , до того ж цей максимум реалізується при однаковому значенні $\omega_c/\omega \approx 0.3$. Збільшення ефективності комбінованого помножувача частоти з магнітним фокусуванням потоку обумовлене дією факторів, що пов'язані з тривимірним рухом електронів у просторі взаємодії.

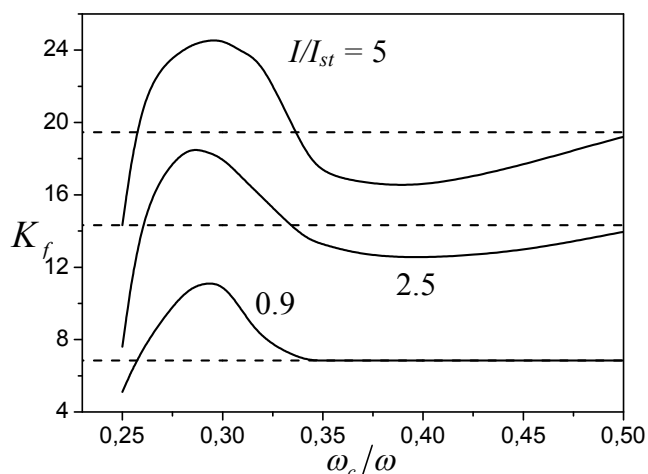


Рис. 20. Залежності коефіцієнту перетворення від нормованої циклотронної частоти.

Восьмий розділ присвячений аналізу електродинамічних властивостей фотонно-кристалічних структур з дефектами періодичності, які дозволяють локалізувати електромагнітне поле і забезпечувати його взаємодію із електронними потоками. Наявність е таких структурах заборонених частотних зон обумовлює існування власних режимів із значною концентрацією електромагнітної енергії в областях порушення періодичності.

Досліджено власні режими декількох різновидів фотонно-кристалічних хвилеводів, які формуються лінійними дефектами періодичності в нескінченних системах з прямокутними та трикутними схемами розміщення елементів. Для чисельних розрахунків власних режимів використовувався добре апробований програмний пакет MIT Photonic Bands (MPB), що вільно розповсюджується.

На рис. 21 наведено декілька схем, які забезпечують існування сповільнених хвиль у пролітному каналі хвилеводів. Схеми на рис. 21,а, б зазвичай ідентифікуються як фотонно-кристалічне волокно з пустотілим каналом. У такій структурі не відбувається розділення двох перпендикулярних поляризацій поля ТЕ та ТМ, оскільки існує ненульова поздовжня компонента хвильового числа k_z . У схемах на рис. 21,в, г структура має заборонені зони для ТЕ поляризації поля і формується декілька власних режимів із сповільненими хвилями, що мають компоненту електричного поля уздовж вісі Ox . Такі хвилі також можна використовувати для взаємодії з електронними потоками. Результати розрахунків дисперсійних характеристик свідчать про те, що у

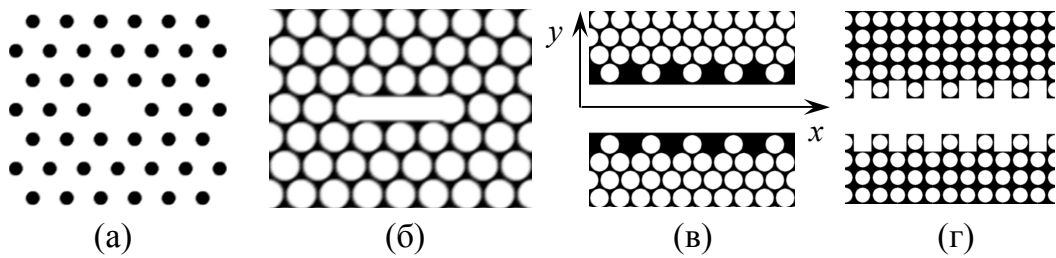


Рис. 21. Схеми фотонно-кристалічних хвильоводів.

даному випадку фазова швидкість зворотних хвиль досягає значення $0.45c$ (для схеми на рис. 21,в).

На рис. 22 наведені просторові розподіли амплітуди електричного поля в каналах фотонно-кристалічних хвильоводів для власних режимів, що знаходяться в межах заборонених зон. Важливою особливістю цих режимів є концентрація енергії поля в центрі пролітного каналу, що значно спрощує розв'язання задачі пропускання циліндричних (рис. 22,а) та стрічкових (рис. 22,б, в) електронних потоків. Ці режими також характеризуються високим ступенем рівномірності поперечного розподілу поля порівняно із звичайними металевими гребінчастими структурами. Отже, в цьому випадку реалізується незначне високочастотне розшарування електронного потоку і ефективність взаємодії підвищується. Цей висновок підтверджується результатами

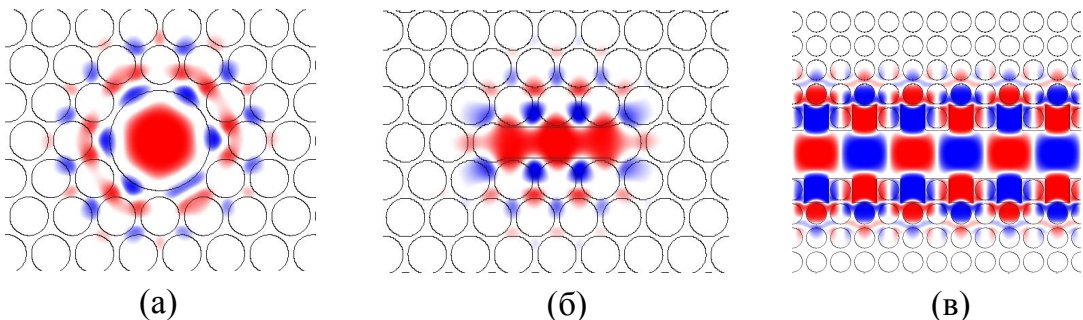


Рис. 22. Амплітудний розподіл електричного поля.

чисельних розрахунків нормованого на максимальне значення коефіцієнта підсилення та електронного ККД (рис. 23). На рис. 23,а через h_0 позначена поперечна координата центру стрічкового електронного потоку; D – ширина пролітного каналу. Суцільними кривими позначені залежності коефіцієнта підсилення при використанні подвійної металевої гребінки. В цьому випадку зсув потоку до середини каналу призводить до зниження коефіцієнта підсилення майже в десять разів через суттєву поперечну неоднорідність поля. Штриховими кривими позначені залежності при використанні як електродинамічної системи фотонно-кристалічного волокна, яке формується діелектричними циліндрами, розміщеними у вузлах прямокутної сітки. В цьому випадку максимальне зниження коефіцієнта підсилення відбувається лише вдвічі, що обумовлено більш однорідним розподілом поля в перерізі хвильоводу порівняно із подвійною гребінкою.

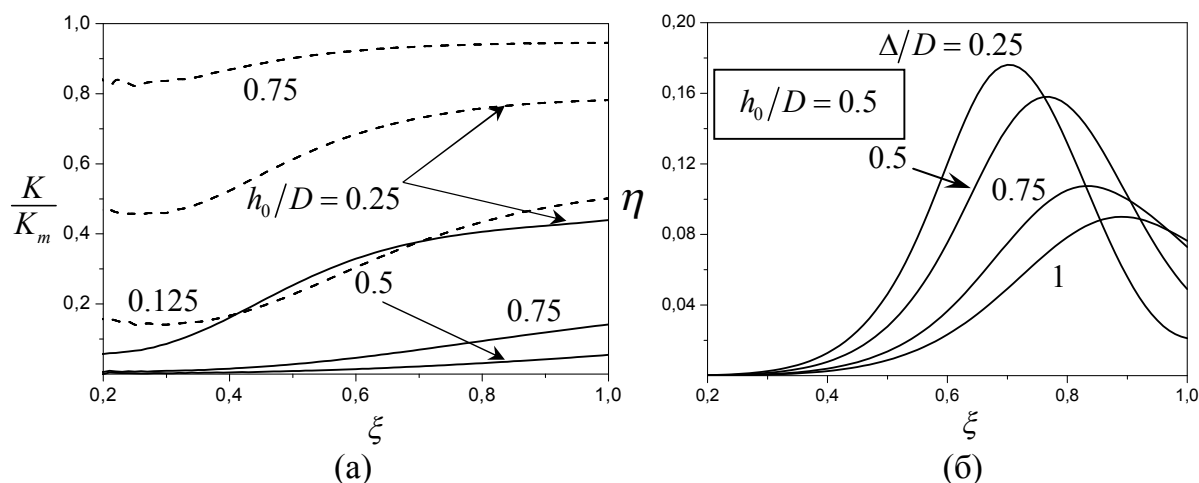


Рис. 23. Залежності нормованого коефіцієнту підсилення та електронного ККД від поздовжньої координати.

Графіки на рис. 23,б розраховані для фотонно-кристалічної структури, зображеної на рис. 22,б. Δ – товщина електронного потоку. Залежності $\eta(\xi)$ відповідають розміщенню пучка в центрі пролітного каналу та різним значенням поперечного розміру електронного потоку із збереженням його первансу. Зменшення поперечного розміру пучка супроводжується підвищенням електронного ККД практично вдвічі. Оскільки у цьому випадку значення індукції магнітного поля, що фокусує електрони, вибиралося достатньо великим, щоб уникнути струмоосідання, то відзначене підвищення ефективності системи обумовлене лише зміною умов взаємодії через неоднорідність розподілу амплітуди електричного поля у перерізі пучка.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

У дисертації наведено вирішення наукової задачі розробки нелінійної самоузгодженої теорії комбінованих електронно-хвильових систем О-типу мм-і субмм-діапазону з урахуванням ряду фізичних факторів, що є вирішальними за умови підвищення частоти випромінювання: тривимірності руху електронів у просторі взаємодії, багатокomпонентності електромагнітного поля, осідання електронів на поверхню електродинамічної системи, неоднорідності магнітостатичного поля, високочастотного розшарування електронного потоку та інших. Розроблені фізичні та математичні моделі багатовимірної електронно-хвильової взаємодії містять основні засоби удосконалення електровакуумних приладів О-типу субмм-діапазону – релятивістські швидкості електронів, багатопучкові електронні потоки, секціонування простору взаємодії, неоднорідність фокусуємого магнітного поля, комбінування схем взаємодії в резонансних та нерезонансних каскадах приладів. Одним з нових напрямків проведених досліджень є застосування фотонно-кристалічних структур в електровакуумних приладах О-типу з метою створення новітніх приладів короткохвильової частини субмм-діапазону.

1. Розвинена нелінійна трьохвимірною теорія резонансних електронно-хвильових систем з релятивістськими електронними потоками, що фокусуються неоднорідним магнітостатичним полем. Збільшення релятивістського фактора призводить до зростання впливу поперечної взаємодії на стартові характеристики приладів – пусковий струм знижується за умови послаблення фокусування електронів. Встановлена основна фізична причина цього явища – взаємодія електромагнітного поля із повільною циклотронною хвилею електронного потоку.

2. За умови нелінійної електронно-хвильової взаємодії в релятивістській системі осідання електронів на поверхню електродинамічної системи є негативним фактором, на відміну від нерелятивістських приладів. Зменшення кількості електронів у цьому випадку супроводжується зниженням електронного ККД та зміною кількісного співвідношення між пролітними та захопленими хвилею електронами на користь перших, що призводить до зникнення суттєво нелінійного явища – коливального гістерезису в зонах генерації.

3. Розвинена багатовимірною нелінійною теорія нерезонансних електронно-хвильових систем мм- і субмм-діапазону з урахуванням впливу зовнішнього високочастотного сигналу, секціонування простору взаємодії й профілювання фокусуємого магнітного поля. Зміна розташування імпедансної поверхні в різних секціях електродинамічної системи забезпечує підвищення ефективності взаємодії та скорочення поздовжньої відстані, на якій досягається максимальний коефіцієнт підсилення. Результати моделювання електронно-хвильової взаємодії дозволяють зробити висновок про часткову компенсацію високочастотного розшарування електронного потоку в цьому випадку і відповідне вирівнювання умов групування електронів за товщиною пучка. Іншим засобом реалізації цього ефекту є формування лінійного просторового розподілу початкових швидкостей в багатошаровому електронному потоці. У цьому випадку спостерігається збільшення коефіцієнту підсилення майже в півтора рази.

4. Нахил силових ліній фокусуємого магнітного поля до поверхні електродинамічної системи забезпечує підвищення ефективності взаємодії та коефіцієнта підсилення нерезонансної електронно-хвильової системи через розміщення електронного потоку в області максимальної інтенсивності високочастотного поля для різних значень індукції фокусуємого поля. На відміну від резонансних кліноотронних приладів, струмоосідання є негативним фактором, що зменшує ефективність енергообміну в системі через зменшення кількості електронів у просторі взаємодії.

5. Результати моделювання неавтономних резонансних електронно-хвильових систем із зовнішнім силовим та параметричним високочастотним впливом свідчать про зміну положення та ширини смуги синхронізації за рахунок просторового розподілу індукції фокусуємого магнітного поля. Таким чином реалізується схема керування характеристиками синхронізованих коливальних систем через зміну середньої крутості коливальної характеристики завдяки зсуву центра локальної неоднорідності фокусуємого поля.

Параметричний вплив за адіабатичної зміни амплітуди магнітної неоднорідності забезпечує модуляцію вихідного сигналу із зміною режиму від безперервного до імпульсного з різною частотою прямування імпульсів.

6. Розвинена багатовимірною нелінійною теорією хвильових і коливальних систем із тривалою взаємодією для різних їх комбінацій з урахуванням збудження вихідного каскаду на гармоніках частоти вхідного сигналу. Зменшення індукції фокусуємого поля призводить до підвищення ефективності помноження частоти через поперечну електронно-хвильову взаємодію. Зокрема, показано, що амплітуда сигналу на 4-й гармоніці збільшується в 1.5-2 рази відносно рівня, що відповідає нескінченному значенню індукції фокусуємого поля. Формування лінійного розподілу початкових поздовжніх швидкостей парціальних пучків багатошарового електронного потоку забезпечує збільшення амплітуди вихідного сигналу в декілька разів порівняно з моношвидкісним потоком заряджених часток.

7. Запропоновано два варіанти застосування фотонно-кристалічних структур, що підтримують уповільнені хвилі, для формування електродинамічних систем електровакуумних приладів короткохвильової частини субмм-діапазону. Розрахунок ефективності електронно-хвильової взаємодії для стрічкового електронного потоку показав майже двократне підвищення електронного ККД при розташуванні пучка в області максимальної інтенсивності поля локалізованої моди фотонно-кристалічного хвильоводу.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Одаренко Е. Н. Самовозбуждение колебаний в резонансных генераторах О-типа с длительным взаимодействием при наклонном магнитостатическом поле / Е. Н. Одаренко, А. А. Шматько // Радиотехника и электроника. – 1992. – Т. 37, № 2. – С. 303–310.

2. Одаренко Е. Н. Влияние магнитостатической локальной неоднородности на пусковые характеристики резонансных генераторов О-типа / Е. Н. Одаренко, А. А. Шматько // Радиотехника и электроника. – 1992. – Т. 37, № 5. – С. 901–910.

3. Odarenko E. N. Nonlinear Theory of Resonant Oscillators with an Oblique Magnetostatic Field / E. N. Odarenko, A. A. Shmat'ko // Journal of Communication Technology and Electronics. – 1994. – Vol. 39, No. 2. – P. 61–66.

4. Odarenko YE. N. Nonlinear Theory of O-Type Microwave Oscillators with Nonuniform Magnetostatic Field (Two-Dimensional Model) / YE. N. Odarenko, A. A. Shmat'ko // Journal of Communication Technology and Electronics. – 1994. – Vol. 39, No. 9. – P. 1–8.

5. Chursin V. Theory of Resonant Relativistic Oscillator with Non-uniform Focusing Field / V. Chursin, E. Odarenko, A. Shmat'ko // Int. J. Infrared and Millimeter Waves. – 1996. – Vol. 17, No. 7. – P. 1165–1180.

6. Одаренко Е. Н. Нелинейная двумерная теория релятивистского резонансного генератора О-типа / Е. Н. Одаренко, В. С. Чурсин,

А. А. Шматько // Вестник ХГУ. Радиофизика и электроника. – 1998. – № 405. – С. 124-128.

7. Odarenko E. N. The Effect of Beam Current Intensity on the Performance of a Relativistic O-Type Microwave Generator with Magnetic Focusing / E. N. Odarenko // Telecommunications and Radio Engineering. – 1999. – Vol. 53, No. 1. – P. 68–71.

8. Alexeev V. V. Theory of the O-Type Resonant Oscillator Subject to Powerful External High-Frequency and Parametric Low-Frequency Forcing / V. V. Alexeev, E. N. Odarenko, A. A. Shmat'ko // Telecommunications and Radio Engineering. – 1999. – Vol. 53, No. 2. – P. 65–67.

9. Алексеев В. В. Теория генератора миллиметрового диапазона с параметрическим управлением / В. В. Алексеев, Е. Н. Одаренко, А. А. Шматько // Вісник Харківського університету. Радиофізика та електроніка. – 1999. – Вип. 1'99, № 427. – С. 122–125.

10. Odarenko E. N. Effect of Electron Beam Thickness Upon the Performance of a Resonant Type-O Carcinotron with a Tapered Magnetostatic Field / E. N. Odarenko, N. G. Shevchenko // Telecommunications and Radio Engineering. – 1999. – Vol. 53, No. 11. – P. 67–72.

11. Одаренко Е. Н. Планарный СВЧ усилитель О-типа с многослойным электронным пучком / Е. Н. Одаренко, Н. Г. Шевченко // Вісник Харківського національного університету. Радиофізика та електроніка. – 2000. – Вип. 1'2000, № 467. – С. 98–101.

12. Одаренко Е. Н. Нелинейная многомерная теория связанных волновых и резонансных электронных систем О-типа с распределенным взаимодействием / Е. Н. Одаренко, А. А. Шматько // Вісник Харківського національного університету. Радиофізика та електроніка. – 2001. – Вип. 1'2001, № 513. – С. 81–85.

13. Мирошниченко В. С. Применение метода колебательных характеристик для анализа нелинейного режима приборов дифракционной электроники – теория и эксперимент / В. С. Мирошниченко, Е. Н. Одаренко, А. А. Шматько // Вісник Харківського національного університету. Радиофізика та електроніка. – 2002. – № 580. – С. 101–104.

14. Одаренко Е. Н. Параметрическое воздействие высокочастотного сигнала на резонансную электронно-волновую систему О-типа / Е. Н. Одаренко, А. А. Шматько // Вісник Харківського національного університету. Радиофізика та електроніка. – 2002. – № 580. – С. 97–100.

15. Одаренко Е. Н. Нелинейная многомерная теория релятивистского генератора дифракционного излучения / Е. Н. Одаренко, А. А. Шматько // Успехи современной радиоэлектроники. – 2007. – № 10. – С. 5–22.

16. Одаренко Е. Н. Нелинейная теория неавтономных многомерных электронно-волновых систем миллиметрового диапазона (усилители и умножители) / Е. Н. Одаренко, А. А. Шматько // Успехи современной радиоэлектроники. – 2007. – № 10. – С. 33–45.

17. Одаренко Е. Н. Умножение частоты в гибридной электронно-волновой системе с длительным взаимодействием (двумерная модель) /

Е. Н. Одаренко, А. А. Шматько // Вісник СумДУ. Серія Фізика, математика, механіка. – 2007. – № 1. – С. 61–74.

18. Одаренко Е. Н. Теория клинотронного усилителя О-типа миллиметрового диапазона / Е. Н. Одаренко, А. А. Шматько // Вісник Харківського національного університету. Радіофізика та електроніка. – 2008. – Вип. 12, № 806. – С. 75–81.

19. Одаренко Е. Н. Дифракционное излучение субтерагерцового диапазона на гармониках ЛОВ в двухрежимном приборе параметрического типа / Е. Н. Одаренко, А. А. Шматько, П. В. Юдинцев // Вісник Харківського національного університету. Радіофізика та електроніка. – 2008. – Вип. 13, № 834. – С. 13-17.

20. Одаренко Е. Н. Многопучковый двухкаскадный умножитель частоты О-типа / Е. Н. Одаренко // Радиофізика и електроніка. – 2010. – Т. 15, № 1. – С. 111–118.

21. Одаренко Е. Н. Нестационарные процессы в гибридной электронно-волновой системе О-типа / Е. Н. Одаренко, А. А. Шматько // Вісник Харківського національного університету. Радіофізика та електроніка. – 2011. – Вип. 18, № 966. – С. 23–30.

22. Одаренко Е. Н. Влияние индукции фокусирующего поля на эффективность комбинированного умножителя частоты / Е. Н. Одаренко // Радиотехника. – 2012. – Вып. 170. – С. 17–21.

23. Шматько А. А., Одаренко Е.Н. Электроника сверхвысоких частот. Основы теории и лабораторный практикум / А. А. Шматько, Е. Н. Одаренко. – Харьков: Факт, 2003. – 248 с.

24. А. с. 1612845 СССР, Генератор дифракционного излучения / Г. И. Вягин, Е. Н. Одаренко, В. Г. Чумак (СССР). – Заявка № 4490363, Приоритет изобретения 5 октября 1988 г., зарегистр. в Гос. реестре изобретений СССР 08.08.90.

25. Одаренко Е.Н., Чурсин В.С., Шматько А.А. Самовозбуждение колебаний в релятивистском резонансном генераторе / Е. Н. Одаренко, В. С. Чурсин, А. А. Шматько // Техника и физика электронных систем и устройств: науч.-техн. конф., 18-20 мая 1995: тезисы докл. – Сумы, 1995. – С. 35-36.

26. Chursin V. Theory of Resonant Relativistic Oscillator with Non-uniform Focusing Field / V. Chursin, E. Odarenko, A. Shmat'ko // 20th Int. Conf. On Infrared and Millimeter Waves: 11-14 Dec 1995: proceedings. – Orlando, FL, USA, 1995. – P. 351-353.

27. Одаренко Е.Н., Чурсин В.С., Шматько А.А. Трехмерная нелинейная теория резонансного релятивистского генератора О-типа / Е. Н. Одаренко, В. С. Чурсин, А. А. Шматько // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо'97): 7-я Международная Крымская конференция, 15-18 сент. 1997 г.: тезисы докл. – Севастополь, 1997. – С. 481–482.

28. Одаренко Е.Н., Шматько А.А. Импульсный релятивистский СВЧ генератор О-типа с магнитным фокусирующим полем / Е. Н. Одаренко, А. А. Шматько // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии

(КрыМиКо'98): 8-я Международная Крымская конференция, 14-17 сент. 1998 г.: тезисы докл. – Севастополь, 1998. – С. 733–734.

29. Chursin V., Odarenko E., Shmat'ko A. Nonlinear Theory of Relativistic Microwave Electron Devices / V. Chursin, E. Odarenko, A. Shmat'ko // Int. Conf. on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (ММЕТ'98): 2-5 June 1998: proceedings. – Kharkov, Ukraine, 1998. – P. 249–251.

30. Одаренко Е. Н. Планарный усилитель бегущей волны миллиметрового диапазона О-типа с разнородными электронными потоками / Е. Н. Одаренко, А. А. Шматько // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо'99): 9-я Международная Крымская конференция, 13-16 сент. 1999 г.: тезисы докл. – Севастополь, 1999. – С. 123–124.

31. Одаренко Е. Н. Теория гибридных электронных приборов мм диапазона / Е. Н. Одаренко, А. А. Шматько // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо'2000): 10-я Международная Крымская конференция, 11-15 сент. 2000 г.: тезисы докл. – Севастополь, 2000. – С. 171–172.

32. Алексеев В. В. Параметрический высокочастотный преобразователь – генератор с магнитным управлением / В. В. Алексеев, Е. Н. Одаренко, А. А. Шматько // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо'98): 8-я Международная Крымская конференция, 14-17 сент. 1998 г.: тезисы докл. – Севастополь, 1998. – С. 199–200.

33. Веселов А. А. Влияние локальной магнитной неоднородности на выходные характеристики синхронизированного генератора мм волн / А. А. Веселов, Е. Н. Одаренко, А. А. Шматько // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо'2002): 12-я Международная Крымская конференция, 9-13 сент. 2002 г.: тезисы докл. – Севастополь, 2002. – С. 203–204.

34. Одаренко Е. Н. Возбуждение внешним сигналом двухкаскадной нелинейной электронно-волновой системы / Е. Н. Одаренко, А. А. Шматько // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо'2001): 11-я Международная Крымская конференция, 11-16 сент. 2001 г.: тезисы докл. – Севастополь, 2001. – С. 195–196.

35. Одаренко Е. Н. Вынужденные колебания в нелинейных электронно-волновых системах О-типа – моделирование и анализ / Е. Н. Одаренко, А. А. Шматько // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо'2002): 12-я Международная Крымская конференция, 9-13 сент. 2002 г.: тезисы докл. – Севастополь, 2002. – С. 201–202.

36. Odarenko E. N. Millimeter Waves Hybrid Devices – Theory and Simulation / E. N. Odarenko, A. A. Shmat'ko // Third IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC), April 23-25, 2002: proceedings. – Monterey, USA, 2002. – P. 137–138.

37. Odarenko E. N. Orottron With Magnetic Nonuniformity – Advanced Millimeter Waves Source / E. N. Odarenko, A. A. Shmat'ko, A. I. Tsvyk // Third

IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC), April 23-25, 2002: proceedings. – Monterey, USA, 2002. – P. 59–60.

38. Одаренко Е. Н. Преобразование характеристик вынужденных колебаний в электронных приборах О-типа мм диапазона / Е. Н. Одаренко, А. А. Шматько // Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития: 1-й Международный Радиоэлектронный форум, 8-10 октября 2002: тезисы докл. часть 2. – Харьков, 2002. – С. 420-422.

39. Одаренко Е. Н. Умножение частоты в гибридной электронно-волновой системе О-типа / Е. Н. Одаренко, А. А. Шматько // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо'2003): 13-я Международная Крымская конференция, 8-12 сент. 2003 г.: тезисы докл. – Севастополь, 2003. – С. 284–285.

40. Одаренко Е. Н. Гибридный преобразователь частоты О-типа с магнитным фокусирующим полем / Е. Н. Одаренко, А. А. Шматько // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо'2004): 14-я Международная Крымская конференция, 13-17 сент. 2004 г.: тезисы докл. – Севастополь, 2004. – С. 213–214.

41. Одаренко Е. Н. Многопучковый умножитель частоты миллиметрового диапазона / Е. Н. Одаренко, А. А. Шматько // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо'2006): 16-я Международная Крымская конференция, 11-15 сент. 2006 г.: тезисы докл. – Севастополь, 2006. – С. 284–285.

42. Одаренко Е. Н. Нерезонансный усилитель О-типа с наклонным фокусирующим полем / Е. Н. Одаренко, А. А. Шматько // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо'2007): 17-я Международная Крымская конференция, 10-14 сент. 2007 г.: тезисы докл. – Севастополь, 2007. – С. 167–168.

43. Одаренко Е. Н. Влияние индукции фокусирующего поля на характеристики клинотронного усилителя / Е. Н. Одаренко, В. А. Свич, А. А. Шматько // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо'2008): 18-я Международная Крымская конференция, 8-12 сент. 2008 г.: тезисы докл. – Севастополь, 2008. – С. 196–197.

44. Одаренко Е. Н. Физическая природа эффекта Смита-Парселла и его моделирование / Е. Н. Одаренко, А. А. Шматько, П. В. Юдинцев // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо'2008): 18-я Международная Крымская конференция, 10-14 сент. 2008 г.: тезисы докл. – Севастополь, 2008. – С. 198–199.

45. Одаренко Е. Н. Двухрежимный источник колебаний О-типа субтерагерцового диапазона / Е. Н. Одаренко, А. А. Шматько, П. В. Юдинцев // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо'2009): 19-я Международная Крымская конференция, 14-18 сент. 2009 г.: тезисы докл. – Севастополь, 2009. – С. 169–170.

46. Одаренко Е. Н. Самосогласованная теория эффекта Смита-Парселла на гармониках частоты ЛОВ в двухрежимном генераторе О-типа / Е. Н. Одаренко, А. А. Шматько, П. В. Юдинцев // СВЧ-техника и

телекомунікаційні технології (КрыМиКо'2010): 20-я Міжнародна Кримська конференція, 13-17 сент. 2010 г.: тези докл. – Севастополь, 2010. – С. 263–264.

47. Novel Double-Mode O-Type Source of Coherent Subterahertz Radiation / E. N. Odarenko, A. A. Shmat'ko, P. V. Yudin [et al.] // TERA*2010 IEEE International Workshop on THz Radiation: Basic Research & Applications, 12-14 Sept. 2010: proceedings. – Sevastopol, Ukraine, 2010. – P. 283-284.

48. Одаренко Е. Н. Двухдиапазонный усилитель на поверхностных и объемных волнах субтерагерцового диапазона / Е. Н. Одаренко, А. А. Шматько, П. В. Юдинцев // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо'2011): 21-я Міжнародна Кримська конференція, 12-16 сент. 2011 г.: тези докл. – Севастополь, 2011. – С. 306–307.

49. Одаренко Е. Н. Фотонно-кристаллические замедляющие структуры в электронике терагерцового диапазона / Е. Н. Одаренко, А. А. Шматько // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо'2011): 21-я Міжнародна Кримська конференція, 11-16 сент. 2011 г.: тези докл. – Севастополь, 2011. – С. 275–276.

50. Одаренко Е. Н. Фотонно-кристаллические волноводы в электронике терагерцового диапазона / Е. Н. Одаренко, А. А. Шматько // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо'2012): 22-я Міжнародна Кримська конференція, 10-14 сент. 2012 г.: тези докл. – Севастополь, 2012. – С. 213–214.

АНОТАЦІЯ

Одаренко Є. М. Нелінійна трьохвимірна теорія комбінованих електронно-хвильових систем О-типу мм та субмм діапазону. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.01 – фізика приладів, елементів і систем. – Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, 2012 р.

У роботі розвинуто нелінійну трьохвимірну теорію комбінованих електронно-хвильових систем О-типу з урахуванням релятивістських швидкостей електронів, неоднорідного магнітостатичного поля, що фокусує електронний потік, багатопучкової структури пучка заряджених часток та інших факторів, які безпосередньо впливають на характеристики приладів мм- та субмм-діапазону.

Досліджено вплив поперечної взаємодії та секціонування електродинамічної системи на ефективність нерезонансної електронно-хвильової системи. Встановлено умови підвищення коефіцієнта підсилення під час застосування багатопучкового електронного потоку з лінійним розподілом швидкостей парціальних пучків та нахиленого фокусуємого магнітного поля.

Встановлено закономірності параметричного впливу неоднорідності магнітного фокусуємого поля на резонансні характеристики синхронізованої коливальної системи.

Розвинуто нелінійну багатовимірну теорію комбінованих помножувачів частоти. Визначено причини підвищення ефективності помноження частоти через зміну індукції магнітостатичного поля та використання багатошвидкісного електронного потоку.

Вперше досліджено енергетичні характеристики багатовимірної взаємодії стрічкових електронних потоків із полями локалізованих мод фотонно-кристалічних хвилеводів у перспективних приладах терагерцової вакуумної електроніки.

Ключові слова: нелінійна теорія, багатовимірна взаємодія, комбіновані прилади, високочастотне розшарування, неоднорідне фокусує поле.

АННОТАЦІЯ

Одаренко Е. Н. Нелинейная трехмерная теория комбинированных электронно-волновых систем О-типа мм и субмм диапазона. – Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.01 – физика приборов, элементов и систем. – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, 2012 г.

В работе развита нелинейная трехмерная теория комбинированных электронно-волновых систем О-типа с учетом релятивистских скоростей электронов, неоднородного магнитостатического поля, которое фокусирует электронный поток, многослойной структуры пучка заряженных частиц и других факторов, оказывающих непосредственное влияние на характеристики приборов мм и субмм диапазона. Получены аналитические выражения для средней крутизны колебательной характеристики в рамках приближения слабого сигнала. Установлены физические причины снижения пускового тока релятивистского генератора при увеличении масс-фактора.

Исследованы закономерности воздействия индукции фокусирующего магнитного поля, величины тока пучка и масс-фактора на эффективность электронно-волнового взаимодействия резонансного генератора с длительным взаимодействием. Показано, что оседание электронов на поверхность замедляющей системы приводит к изменению формы зоны генерации за счет исчезновения области колебательного гистерезиса. Токооседание в релятивистских приборах с Гауссовой амплитудной огибающей высокочастотного поля в резонаторе является негативным фактором и обуславливает снижение электронного КПД для всех рассмотренных значений масс-фактора и тока пучка.

Исследовано влияние поперечного взаимодействия и секционирования электродинамической системы на эффективность нерезонансной электронно-волновой системы. Показано, что коэффициент усиления в секционированной системе увеличивается при изменении расположения замедляющей системы относительно электронного потока. Основная причина данного эффекта состоит в выравнивании условий группирования электронов по толщине пучка. Установлены условия повышения коэффициента усиления при использовании

многослойного электронного потока с линейным распределением скоростей парциальных пучков и наклонного фокусирующего магнитного поля.

Установлены закономерности параметрического влияния локальной неоднородности магнитного фокусирующего поля на резонансные характеристики синхронизированной колебательной системы. Перемещение центра магнитной неоднородности вдоль пространства взаимодействия приводит к сдвигу и изменению ширины полосы синхронизации и, соответственно, позволяет управлять нестационарными и спектральными характеристиками прибора. Гармоническая модуляция параметров локальной неоднородности фокусирующего поля позволяет получать как непрерывные, так и импульсные режимы работы генератора с различной частотой следования импульсов.

Развита нелинейная многомерная теория комбинированных умножителей частоты. Рассмотрены двухкаскадные схемы с нерезонансным модулятором и резонансным выходным каскадом. Определены основные причины повышения эффективности умножения частоты за счет изменения индукции магнитостатического поля и применения многоскоростного электронного потока. Снижение магнитной индукции приводит к увеличению коэффициента преобразования частоты преимущественно для коэффициентов умножения $n \geq 4$ за счет взаимодействия электронов с поперечными компонентами высокочастотного поля. Установлены области значений нормированной циклотронной частоты, в которых наблюдается повышение мощности выходного сигнала для различных вариантов выходного каскада: генератора дифракционного излучения и резонансной ЛОВ.

Линейное изменение начальной скорости электронов в разных парциальных пучках многослойного электронного потока позволяет в несколько раз увеличить амплитуду выходного сигнала умножителя частоты за счет частичной компенсации эффекта высокочастотного расслоения. Продольная скорость электронов уменьшается при удалении от поверхности замедляющей системы. В результате численного моделирования многомерного электронно-волнового взаимодействия установлено, что применение многоскоростного электронного потока позволяет получать колебания в выходном каскаде умножителя частоты в том случае, когда для обычного моноскоростного пучка условия возбуждения не выполняются.

Исследованы электродинамические свойства фотонно-кристаллических волноводов, поддерживающих режимы с замедленными волнами. Рассмотрено два варианта таких периодических структур: фотонно-кристаллическое волокно и волновод, сформированный линейным дефектом двухмерной периодической структуры, состоящей из элементов цилиндрической формы. С помощью свободно распространяемого программного пакета MIT Photonic Bands (MPB) рассчитаны дисперсионные характеристики и пространственное распределение амплитуды и энергии электрического поля для собственных режимов фотонно-кристаллической структуры, соответствующих запрещенным зонам. Установлено, что для размещения электронного потока в максимуме поля продольной компоненты электрического поля его следует пропускать в центре

пролетного канала, что значительно облегчает юстировку и снижает требования к поперечным размерам пучка.

Впервые исследованы энергетические характеристики многомерного взаимодействия ленточных электронных потоков с полями локализованных мод фотонно-кристаллических волноводов в перспективных приборах терагерцовой вакуумной электроники.

Ключевые слова: нелинейная теория, многомерное взаимодействие, комбинированные приборы, высокочастотное расслоение, неоднородное фокусирующее поле.

SUMMARY

Odarenko E. N. Nonlinear three-dimensional theory of the millimeter and submillimeter waves hybrid O-type beam-wave systems. – Manuscript.

Thesis for doctor degree in physical and mathematical sciences on speciality 01.04.01 – physics of devices, elements and systems. – Kharkiv national university of radioelectronics, Kharkiv, 2012.

Nonlinear three-dimensional theory of the hybrid O-type beam-wave systems that takes into account the relativistic electron velocities, nonuniformity of the magnetic focusing field, multilayer electron beam structure and other factors that effect on the millimeter and submillimeter devices characteristics is developed.

Effect of the transversal interaction and electrodynamic system sectioning on the nonresonant beam-wave system efficiency is investigated. Conditions of the gain enhancement under the assumption of multilayer electron beam with linear velocities distribution of the partial beams are obtained.

Regularities of the parametric influence of the magnetic focusing field nonuniformity on the locked oscillating system resonance characteristics are determined.

Nonlinear multidimensional theory of the hybrid frequency multipliers is developed. Reasons of the frequency multiplication efficiency enhancement due to magnetic induction variation and multispeed electron beam using are determined.

Energy characteristics of the multidimensional interaction of the sheet electron beams with the fields of photonic crystal waveguides localized modes are investigated in the perspective vacuum terahertz devices.

Keywords: nonlinear theory, multidimensional interaction, hybrid devices, high-frequency layering, nonuniform focusing field.