

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ УКРАЇНИ  
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

На правах рукопису


Крутько Олег Борисович

НЕЛІНІЙНА САМОУЗГОДЖЕНА ТЕОРІЯ РЕЛЯТИВІСТСЬКИХ  
ПАРАМЕТРИЧНИХ СИСТЕМ ЗІ СКРЕШЕНИМИ ПОПЕРЕЧНИМИ  
ПЕРІОДИЧНО-РЕВЕРСИВНИМИ ЕЛЕКТРИЧНИМИ  
І МАГНІТНИМИ ПОЛЯМИ

Спеціальність 01.04.04. - Фізична електроніка

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття вченого ступеня  
кандидата фізико-математичних наук



СУМИ 1995

3 57,5  
Дисертація є рукопис.  
Робота виконана на кафедрі  
державного університету

ЛНБ України ім.В.Стефаніка



00761445 (R)

НАУКОВИЙ КЕРІВНИК

доктор фізико-математичних наук,  
професор В.В. Куліш

ОФІЦІЙНІ ОПОНЕНТИ

доктор фізико-математичних наук,  
професор М.О. Азаренков

кандидат фізико-математичних наук,  
доцент Г.С. Воробйов

ПРОВІДНА ОРГАНІЗАЦІЯ Київський державний університет

Захист відбудеться "25" Листопада 1995 р. о 15 год.  
на засіданні Спеціалізованої вченої ради К 22.01.01  
при Сумському державному університеті, за адресою:

244007 м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2,  
СумДУ, корпус "ЕТ", ауд. 216

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці  
Сумського державного університету.

Автореферат розісланий 1995 г.

ЛНБ ім. В. Стефаніка  
АН України

Вчений секретар \_\_\_\_\_

Спеціалізованої вченої ради,

кандидат фіз.-мат. наук, доцент

А.С. Опанасюк

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

### Актуальність роботи.

На сьогодні, одним з найбільш перспективних джерел надпотужного когерентного електромагнітного випромінювання є лазери на вільних електронах (ЛВЕ). Ці прилади мають такі виключні властивості як то: високі рівні вихідних потужностей, широкий діапазон робочих частот та можливість їх плавної зміни. Однак, слід відмітити, що перші ділчі установки мали досить незначчі рівні ККД ( для ЛВЕ-генераторів  $\sim 1-3\%$ , а для ЛВЕ-підсилювачів  $\sim 3-5\%$  ). В зв'язку з цим, в сучасних приладах класу ЛВЕ застосовуються спеціальні конструктивні заходи, які дозволяють підняти рівень ККД до десятків відсотків. Однак, в умовах практики їх реалізація стикається зі значними конструктивними труднощами. Крім того, створення приладів класу ЛВЕ потребує використання ряду спеціальних надтехнологій а самі установки є досить дорогими. Це ставить на перший план за актуальність три головні проблеми. Перша із них - розробка нових модифікацій конструкцій ЛВЕ, які мали б більш високі рівні технічних характеристик, ніж відомі. Друга проблема полягає у створенні нелінійної самоузгодженої теорії, яка з високою точністю має описувати фізику процесів в області взаємодії цих пристроїв. І, нарешті, третя проблема полягає у розробці більш досконалої ( з технологічної точки зору ) елементної бази для ЛВЕ. Зокрема компактних прискорювачів електронних пучків, які б мали прийнятні темпи прискорення.

Таким чином, проведення дослідження параметрично-резонансних механізмів взаємодії релятивістських електронних потоків з періодично-реверсивними електромагнітними полями різних конфігурацій є завданням вельми актуальним. По перше, при цьому відкриваються можливості створення нових перспективних схем ЛВЕ і прискорювачів заряджених частинок з більш високими, ніж у відомих, рівнями експлуатаційних характеристик. По друге - підвищується ступінь і глибина розуміння фізичної специфіки такого типу плазмоподібних релятивістських систем, що само по собі є корисним з пізнавальної точки зору.

### Мета роботи:

а) розробка нелінійної самоузгодженої теорії механізмів

параметрично-резонансної взаємодії релятивістських електронних потоків з поперечними схрещеними періодично-реверсивними електричним і магнітним полями;

б) з'ясування можливостей створення на базі релятивістських параметричних систем зі схрещеними поперечними періодично-реверсивними електричним і магнітним полями нових модифікацій конструкцій ЛВЕ і лінійних індукційних прискорювачів заряджених частинок.

#### Наукова новизна

Що до теорії ЛВЕ:

- розроблена нова розрахункова схема з двократним усередненням, що базується на використанні методу усередненого кінетичного рівняння.

В фізиці процесів:

- доведена можливість ізохронізації ЛВЕ ЕН-убітронного типу за рахунок оптимальної варіації, в тому числі, електричної компоненти поля накачки;

- запропоновано новий принцип прискорення потоків заряджених частинок і квазінейтральної плазми.

В проектно-конструкторському плані:

- запропоновано ряд нових конструкцій та схем ЛВЕ з ЕН-убітронним полем накачки;

- запропонована принципово нова схема періодично-реверсивного індукційного прискорювача потоків плазми ( у тому числі і квазінейтральної ).

#### Наукові положення, що виносяться на захист.

1. Принципово нові модель, схема та конструкція лазеру на вільних електронах з накачкою схрещеними поперечними періодично-реверсивними електричним та магнітним полями - ЛВЕ-ЕН-убітрона.

2. Нелінійна балістична теорія ЛВЕ-генератора з ЕН-убітронним полем накачки.

3. Нелінійна кінетична самоузгоджена теорія ЛВЕ-підсилювача з ЕН-убітронним полем накачки.

4. Принципово нові модель, схема та конструкція періодично-реверсивного індукційного прискорювача потоків заряджених частинок та квазінейтральної плазми.

5. Нелінійна кінетична самоузгоджена теорія запропонованого періодично-реверсивного індукційного прискорювача.

### Практична цінність.

Запропоновані в роботі нові схеми та конструкції лазерів на вільних електронах ЕН-убітронного типу складають ідейну та проектну основу для створення промислових зразків надпотужних компактних ЛВЕ-генераторів і підсилювачів, що можуть мати високі рівні ефективності. Схема та конструкція періодично-реверсивного індукційного прискорювача, що запропонована в роботі уявляє собою один з можливих компактних джерел для формування релятивістських електронних потоків в установках класу ЛВЕ. Крім того, вона може використовуватися як для прискорення пучків заряджених частинок одного знаку, так і потоків плазми ( у тому числі і квазінейтральної ). Розроблена пошукачем розрахункова схема з двократним усередненням ( на основі методу усередненого кінетичного рівняння ), створє ефективну основу для поширення нових проектних методик в галузі техніки ЛВЕ.

### Апробація роботи.

Основні результати дисертаційної роботи опубліковано в 8 друкованих працях, доповідались і обговорювались на науково-технічній конференції "Фізика і техніка електронних систем і пристроїв" ( Суми, Сумський держуніверситет, 18-20 травня 1995 ), Міжнародній науковій конференції, присвяченій 150-річчю від дня народження Івана Пуля ( Львів, Державний університет "Львівська політехніка", 23-24 травня 1995 ). Крім того, за матеріалами дисертаційної роботи було подано заявку на винахід, на яку отримано позитивне рішення Держкомвинаходів Росії.

### Структура і обсяг роботи

Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох глав, закінчення, списку літератури та шести додатків. Обсяг дисертації сягає 139 сторінок і 37 малюнків. Бібліографія містить 99 найменувань і складає 11 сторінок, а додатки - 23 сторінки.

### ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність теми дисертації, сформульовані мета роботи, положення, що виносяться на захист, наукова новизна роботи, а також дається стислий огляд результатів, отриманих в дисертації.

У першій главі дається огляд експериментальних та теоретичних праць, в яких досліджуються прилади класу ЛВЕ та їх елементна база.

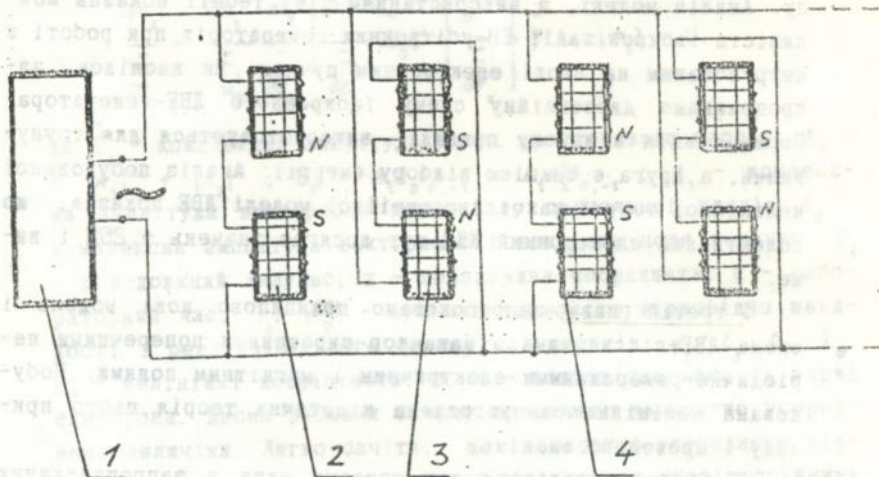
У першому розділі цієї глави були розглянуті основні схеми лазерів на вільних електронах і методи підвищення ККД ЛВЕ, з'ясовані достоїнства та недоліки цих приладів. Визначено проблеми та напрямки їх вирішення. Крім того, в цьому ж розділі описані традиційні типи лінійних та циклічних індукційних прискорювачів заряджених частинок, особливості їх роботи та можливі шляхи розширення функціональних можливостей.

У другому розділі розглянуто основні методи дослідження параметричних лазерів на вільних електронах. Серед цих методів особливу увагу було приділено методам асимптотичного інтегрування Богольбова, великих частинок, усередненого кінетичного рівняння та повільно змінюваних амплітуд.

У другій главі запропоновано принципово нову модель, схему та конструкцію ЛВЕ-генератора з накачкою схрещеними поперечними періодично-реверсивними електричним і магнітним полями ( надалі будемо називати їх ЕН-убітронами ). Побудовано нелінійну балістичну теорію цього класу приладів і проведено її аналіз.

У першому розділі описано один з можливих варіантів схеми та конструкції ЛВЕ-генератора ЕН-убітронного типу ( див. фіг.1 ). Розглянуті якісні особливості взаємодії релятивістських електронних потоків з ЕН-убітронними полями. Побудовано теоретичну модель і сформульовано постановку задачі.

У другому розділі цієї глави побудовано нелінійну балістичну теорію ЛВЕ-генератора ЕН-убітронного типу и розраховані його основні вихідні характеристики. Як базовий був використан метод асимптотичного інтегрування Богольбова. Аналіз побудованої теорії показав можливість ізохронізації взаємодії в ЕН-убітронних ЛВЕ-генераторах за рахунок оптимального підбору, в тому числі, параметрів електричної компоненти поля накачки. З'ясовано, що максимальні рівні електронного ККД подібних ізохронних моделей досягають значень  $\sim 70\%$ . З'ясовано, однак, що ізохронні моделі ЕН-убітронних ЛВЕ-генераторів є більше чутливими до якості групування електронних сгустків ( за початковими фазами вльоту в область взає-



Фіг.1 Структурна електрична схема ЕН-убітронної системи накачки. Тут цифрой 1 позначено джерело низькочастотного змінного струму, цифрой 2 - сердечники електромагнітів, 3 - обмотки електромагнітів, 4 - електромагніти.

модії ), ніж ізокронні моделі з повздовжним електростатичним компенсуючим полем.

У третьому розділі, на базі методу асимптотичного інтегрування Боголюбова і методу великих частинок, побудовано нелінійну колективну теорію ЛВЕ-генератора ЕН-убітронного типу. Аналіз моделі, з використанням цієї теорії показав можливість ізохронізації ЕН-убітронних генераторів при роботі з згрупованим на вході електронним пучком. Як наслідок, запропоновано двосекційну схему ізокронного ЛВЕ-генератора. Перша секція в даному приладі використовується для групування, а друга є секцією відбору енергії. Аналіз побудованої нелінійної теорії такої двосекційної моделі ЛВЕ показав, що колективний електронний ККД тут досягає значень ~ 25% і вище.

У третій главі запропоновано принципово нові модель і схема ЛВЕ-підсилювача з накачкою скрещеними поперечними періодично-реверсивними електричним і магнітним полями. Побудована нелінійна самоузгоджена кінетична теорія цього приладу і проведено аналіз.

У першому розділі глави описана одна з запропонованих схем і конструкцій ЛВЕ-підсилювача ЕН-убітронного типу. Побудовано теоретичну модель і проведено постановку задачі.

У другому розділі розв'язано задачу про рух релятивістського електронного потоку у зовнішніх електромагнітних полях. Для цього розроблено нову розрахункову схему з двократним усередненням, що базується на використанні методу усередненого кінетичного рівняння. Показано, що при цьому кінетичне рівняння Больцмана зводиться до двократно-усередненого кінетичного рівняння:

$$\left\{ \frac{\partial}{\partial t} + \left[ v_z + \frac{e^2 g_z}{2m\gamma^{(0)}} A_0 + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{e^2 g_z}{2m\gamma^{(0)} \Omega_{\Psi}} \right) \right] i E_3 B_{\theta}^* + \right.$$

$$\left. + \text{к. с.} + \frac{e^2}{\Omega_{\Psi}^2} \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} |E_3|^2 \right] \frac{\partial}{\partial z} + \left[ -eE_0 + \frac{e t_z}{2} \frac{\partial A_0}{\partial z} + \right.$$

$$\begin{aligned}
 & + \left( - \frac{e^{-k_z} a_z}{\partial \varphi \partial z} - \frac{e^{\varphi_z} g_z k_\varphi}{m \gamma_0^2 \Omega_\varphi} \right) \tilde{E}_J E_J^* + \text{к.с.} - - e^4 \left( \frac{1}{\Omega_\varphi^2} \right. \\
 & \left. \times \frac{\partial z}{\partial \varphi} + \frac{2v_z}{\Omega_\varphi^3} \frac{\partial \Omega_\varphi}{\partial z} \right) \frac{\partial}{\partial z} \left( |E_3|^2 \right) \frac{\partial}{\partial z} \left. \right\} f(t, z, \varphi_z) = 0,
 \end{aligned}$$

де  $\tilde{E}_3$  - комплексна амплітуда хвилі просторового заряду;  $A_0 = |A_1|^2 + |A_2|^2$ ;  $B_0 = A_1 A_2 \delta_{\sigma,+1} + A_1^* A_2^* \delta_{\sigma,-1}$ ;  $A_1$  - комплексна амплітуда векторного потенціалу сигнальної хвилі;  $A_2$  - комплексна амплітуда векторного потенціалу поля накачки;  $\varphi_z$  - поздовжній імпульс;  $z$  - поздовжня координата;  $t$  - лабораторний час;  $v_z, \gamma_0^{(0)}$  - нульові гармоніки відповідно швидкості і релятивістського фактору електронів;  $g_z, \ell_j, \Omega_\varphi, k_\theta, k_\varphi$  - нелінійні коефіцієнти;  $m, e$  - відповідно маса та заряд електрона. Двома рисками зверху позначені двократно усереднені величини. Легко бачити, що двократно-усереднене рівняння є значно простішим і характеризується квазіпостійними коефіцієнтами. Проведено перехід від двократно усередненої до неусередненої функції розподілу електронів. Проведений порівняльний аналіз показав що застосування запропонованої нової розрахункової схеми є більш ефективним ніж відомої (з однократним усередненням). Це досягається за рахунок того, що процедура вирішення двократно-усередненого кінетичного рівняння при цьому виявляється значно простішою, ніж однократно-усередненого. До того ж отримані рішення є більш точними і, як наслідок, мають більш широкі рамки застосування.

У третьому розділі цієї ж глави, на бази методу повільно змінюваних амплітуд, отримано систему кубічно-нелінійних вкорочених рівнянь, яка описує самоузгоджену динаміку комплексних амплітуд зовнішніх та власних хвильових полів з одночасним урахуванням таких факторів як:

- вплив ненульового початкового поперечного імпульсу електронів в пучку;
- вплив як поздовжнього так і поперечного теплового розподілу електронів в пучку за швидкостями;

- в) можливість повільної зміни ( по довжині області взаємодії ) параметрів ЕН-убітронного поля накачки;
- г) вплив зовнішнього поперечного електростатичного поля підпору;
- д) можливість реалізації діаманітного механізму генерації додаткового магнітного поля накачки;
- е) вплив ефекту нелінійної генерації додаткового магнітного поля накачки;
- є) вплив ефекту нелінійної генерації власного поперечного електричного поля.

У четвертому розділі проведено аналіз даної моделі на базі самузгодженої системи кубічно-нелінійних рівнянь. Для цього остання була переформульована у адаптованій формі. Аналіз квадратичного ( за амплітудами хвиль ) наближення показав, що ЕН-убітронні моделі ЛВЕ-підсилювачів повинні характеризуватись більшими коефіцієнтами підсилення, ніж еквівалентні Н-убітронні. Числове інтегрування кубічно-нелінійної системи підтвердило цей висновок. Як з'ясовано, більш високі рівні коефіцієнта підсилення ЕН-убітронних систем пов'язані з реалізацією двох нових фізичних явищ - ефекту часткової компенсації втрат енергії електронного потоку на випромінювання та нелінійної стабілізації фази неузгодження. Було досліджено залежність ефективності взаємодії та коефіцієнта підсилення від величини амплітуди поперечного вихрового електричного поля. Доведена можливість реалізації в ЕН-убітронних ЛВЕ-підсилювачах ізохронного режиму взаємодії, обумовленого варіацією електричної компоненти поля накачки. На основі цього запропоновано дві нових схеми ізохронних підсилювачів ЕН-убітронного типу. Перша з них є трьохсекційною схемою з варіацією амплітуди комбінованого ЕН-убітронного поля накачки. Аналіз показав, що в цій моделі реалізуються два механізми пригнічення насичення підсилення - прискорувальний та трансформаційний, які конкурують між собою. Залежність коефіцієнту підсилення та оптимальний розподіл амплітуди магнітного ( розподіл електричного поля має такий же вигляд ) поля по довжині області зображені на фіг. 2. Другою з запропонованих ізохронних схем є ЕН-убітронний підсилювач з оптимальною варіацією частоти ЕН-поля накачки. Як з'ясовано рівні ККД запропонованих приладів в декілька разів

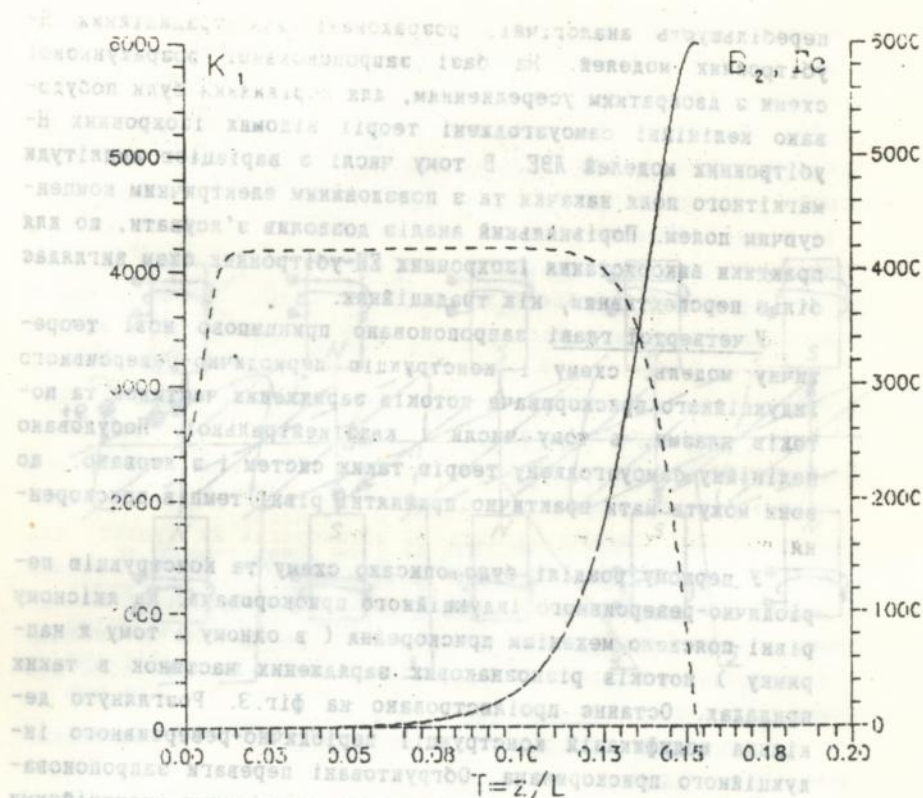


Fig. 2. Характеристики трьохсекційної ізокронної ЕН-убітронної моделі. Суцільна крива відповідає залежності коефіцієнту підсилення, пунктирна - оптимальному розподілу амплітуди магнітного поля. Параметри моделі: період ондуляції віглера  $\lambda_z = 2$  см, частота сигнальної хвилі  $\omega = 5.57 \cdot 10^{12} \text{ с}^{-1}$ , плазмова частота  $\omega_p = 2 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1}$ , початковий релятивістський фактор електронів в потоці  $\gamma_0 = 5.9763349442$ , максимальна амплітуда вихрового електричного поля  $E_2 = 4 \cdot 10^5 \text{ В/м}$ .

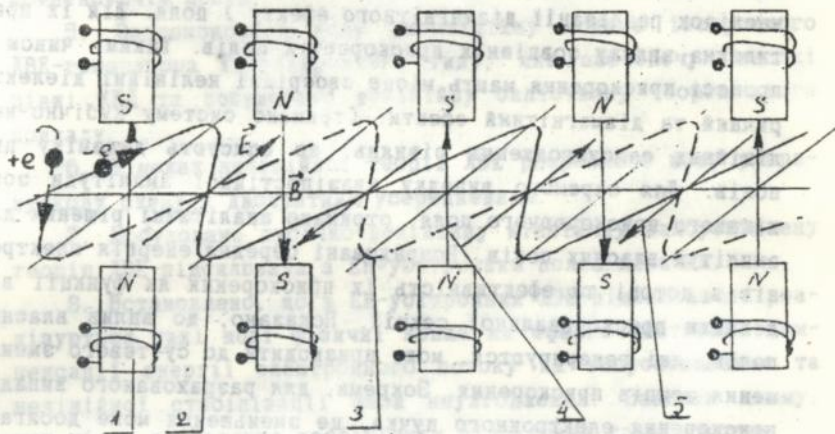
перебільшують аналогічні, розраховані для традиційних Н-убітронних моделей. На базі запропонованої розрахункової схеми з двократним усередненням, для порівняння були побудовано нелінійні самоузгоджені теорії відомих ізохронних Н-убітронних моделей ЛВЕ. В тому числі з варіацією амплітуди магнітного поля накачки та з повздовжним електричним компенсуючим полем. Порівняльний аналіз дозволив з'ясувати, що для практики використання ізохронних ЕН-убітронних схем виглядає більш перспективним, ніж традиційних.

У четвертій главі запропоновано принципово нові теоретичну модель, схему і конструкції періодично-реверсивного індукційного прискорювача потоків заряджених частинок та потоків плазми, в тому числі і квазінейтральної. Побудовано нелінійну самоузгоджену теорію таких систем і з'ясовано, що вони можуть мати практично прийнятні рівні темпів прискорення.

У першому розділі було описано схему та конструкції періодично-реверсивного індукційного прискорювача. На якісному рівні пояснено механізм прискорення ( в одному і тому ж напрямку ) потоків різнознакових заряджених частинок в таких приладах. Останнє проілюстровано на фіг.3. Розглянуто декілька модифікацій конструкції періодично-реверсивного індукційного прискорювача. Обгрунтовані переваги запропонованих систем над відомими лінійними та циклічними індукційними прискорювачами. Побудовано теоретичну модель запропонованого прискорювача.

У другому розділі цієї глави побудовано нелінійну балістичну теорію прискорення електронів в періодично-реверсивних індукційних прискорювачах. На основі даної теорії були визначені максимальні енергетичні можливості таких систем. Як базовий, при цьому застосовувався метод асимптотичного інтегрування Боголюбова. Аналіз показав, що при відносно незначних амплітудах прискорюючого електричного та магнітного полів можна досягнути практично цікавих рівнів темпу прискорення  $\sim 3-4$  МеВ/м і більше ( для електронних пучків ).

У третьому розділі побудовано нелінійну кінетичну самоузгоджену теорію прискорення щільного електронного пучку в періодично-реверсивних індукційних прискорювачах. Як базові, були застосовані метод усередненого кінетичного рівняння та



Фіг. 3. Рух заряджених частинок в схрещених поперечних періодично-реверсивних електричному та магнітним полях. Цифри 1 позначені електромагніти, 2 - рух негативно заряджених частинок, 3 - рух позитивно заряджених частинок, 4 - вектори індукції магнітного поля, 5 - вектори напруженості електричного поля.

метод повільно змінюваних амплітуд. Проведений аналіз показав, що при достатній щільності електронного потоку у прискорювальній області мають генеруватися власні електричні та магнітні поля. З них найбільший вплив на процес прискорення мають ефекти генерації поперечно-продовжнього електричного ( пов'язаного з локальними порушеннями квазінейтральності плазми пучка ) та поперечно-реверсивного магнітного ( що виникає внаслідок реалізації діаманітного ефекту ) поля. Дія їх протилежна впливу зовнішніх прискорюючих полів. Таким чином в процесі прискорення мають місце своєрідні нелінійні діелектричний та діаманітний ефекти. Стримано систему кубічно-нелінійних самоузгоджених рівнянь, що описують динаміку цих полів. Для окремого випадку квазіпостійної амплітуди зовнішнього прискорюючого поля, отримано аналітичні рішення для амплітуд власних полів. Розраховані середня енергія електронів в потоці та ефективність їх прискорення як функції від довжини прискорювальної секції. Показано, що вплив власних полів, які генеруються, може призводити до суттєвого зменшення темпів прискорення. Зокрема, для розрахованого випадку прискорення електронного пучка, це зменшення може досягати 40%.

В заклченні приведені основні результати і висновки, які були отримані в дисертаційній роботі.

В додатках приведено аналітичні вирази для нелінійних коефіцієнтів у системах вкорочених рівнянь і відповідні в рішеннях для функції розподілу. Крім того, тут приведені вирази для швидко осцилюючих поправок, що використовувались при обчисленні однократно і двукратно усереднених функцій розподілу електронів.

#### ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ВИСНОВКИ

Таким чином в дисертаційній роботі були отримані такі основні результати:

1. Запропоновано принципово нові теоретична модель, схема і конструкція лазера на вільних електронах з накачкою схрещеними поперечними періодично-реверсивними електричним та магнітним полями - ЛВЕ-ЕН-убітронку.

2. Побудовано нелінійну балістичну теорію ЛВЕ-генератора з ЕН-убітронним полем накачки.

3. Показано можливість ізохронізації ЕН-убітронного ЛВЕ

генератора за рахунок оптимального підбору параметрів електричної компоненти поля накачки.

4. З'ясовано, що ізохронні моделі ЕН-убітронних ЛВЕ-генераторів є більше чутливими до якості групування електронних стуктів ( за початковими фазами вльоту в область взаємодії ), ніж ізохронні моделі з повздовжним електростатичним компенсуючим полем.

5. Запропоновано нову двосекційну модель ізохронного ЛВЕ-генератора ЕН-убітронного типу, яка забезпечує високі рівні ККД та побудовано нелінійну балістичну теорію цього приладу.

6. В межах нелінійної теорії ЛВЕ розроблено нову розрахункову схему з двократним усередненням.

7. Побудовано кубічно-нелінійну кінетичну самоузгоджену теорію ЛВЕ-підсилювача з ЕН-убітронним полем накачки.

8. Встановлено, що в ЕН-убітронних ЛВЕ-підсилювачах реалізуються такі нові фізичні явища як ефекти часткової компенсації енергії електронного потоку на випромінювання та нелінійної стабілізації фази неузгодження. Завдяки цьому, має місце збільшення коефіцієнту підсилення таких систем.

9. Доведено можливість реалізації ізохронного режиму взаємодії в ЕН-убітронних підсилювачах за рахунок, в тому числі, оптимальної варіації параметрів електричної компоненти ЕН-убітронного поля накачки.

10. Запропоновано нову трьохсекційну схему ізохронного вискоефективного ЛВЕ-підсилювача з варіацією амплітуди зовнішнього комбінованого ЕН-поля і побудовано нелінійну самоузгоджену теорію цього приладу. Встановлено, що даних моделях реалізуються два механізми пригнічення насичення підсилення - прискоривальний та трансформаційний, які конкурують між собою.

11. Запропоновано нову модель вискоефективного ЛВЕ-підсилювача з варіацією часової частоти ЕН-поля по довжині області взаємодії та побудовано нелінійну самоузгоджену теорію цього приладу.

12. Шляхом порівняльного аналізу еквівалентних Н- і ЕН-убітронних моделей, показано що ізохронні моделі останніх характеризуються більш високими рівнями ефективності та коефіцієнту підсилення.

13. Запропонована принципово нові теоретична модель, схема та конструкція періодично-реверсивного індукційного прискорювача потоків заряджених частинок. Показано, що такі прискорювачі мають властивість зарядової інваріантності і, таким чином, придатні для прискорення потоків плазми, в тому числі квазінейтральної.

14. Побудована нелінійна кінетична самоузгоджена теорія періодично-реверсивного індукційного прискорювача і показано що такі прилади можуть мати практично прийнятні рівні темпу прискорення.

15. З'ясовано, що в процесі прискорення щільних потоків заряджених частинок в періодично-реверсивних індукційних прискорювачах реалізуються нелінійні діаманітний та діелектричний ефекти. Останні полягають в тому, що при цьому генеруються власні електричні та магнітні поля. Це може призводити до суттєвого зменшення темпів прискорення.

Основні результати дисертаційної роботи надруковані в таких працях:

1. Кулиш В.В., Крутько О.Б. Ускорение заряженных частиц в скрещенных периодически-реверсивных электрическом и магнитном полях. //Письма в ЖТФ, т.21, вып.9, стр. 52-55.
2. Кулиш В.В., Крутько О.Б. Усилительные свойства лазеров на свободных электронах с комбинированной скрещенной ЕН-убитронной накачкой. //Письма в ЖТФ, т.21, вып.11, стр. 47-51.
3. Кайлык О.Г., Квак А.А., Крутько О.Б. Про можливість створення ізохронних лазерів на вільних електронах нового типу. //УФЖ, 1995, т.40, №9, с. 922-925.
4. Кулиш В.В., Крутько О.Б. Ускорение заряженных частиц в скрещенных периодически реверсивных электрическом и магнитном полях. //Вестник СумГУ, 1995, №2, с. 5-13.
5. Кулиш В.В., Крутько О.Б. Лазер на свободных электронах с комбинированной скрещенной ЕН-убитронной накачкой. //Вестник СумГУ, 1995, № 2, с. 14-26.
6. Кулиш В.В., Кайлык А.Г., Квак А.А., Крутько О.Б., Рубан А.И., Савченко В.И. Лазер на свободных электронах. //Заявка на изобретение, N 5058137 ( Российская федерация ). Положительное решение от 17 января 1995 года. Приоритет от 07.08.92.

7. Кайлюк А.Г., Квак А.А., Крутько О.Б. Движение заряженных частиц в нестационарных скрещенных ЕН-убитронных полях. //Деп. рук. Киев, 1991, 26 с. - Рукопись представлена Сумским физ. - технол. институтом. Деп. в УкрНИИТИ 12.08.91, N1146 Ук-91.
8. Кайлюк А.Г., Квак А.А., Крутько О.Б. О возможности создания ЛСЭ нового типа. //Деп. рук. Киев, 1992, 16с. -Рукопись представлена Сумским физ. -технол. институтом. Деп. в УкрИНТЭИ, 28.04.92, N 479 Ук-92.
9. Куліш В.В., Крутько О.Б. Використання методу усереднення кінетичного рівняння в нелінійних задачах релятивістської електродинаміки. //Матеріали міжнародної наукової конференції присвяченої 150-річчю від дня народження Івана Пулюя. Львів 23-24 травня 1995 року. Тези доповідей. с. 115-117.  
Слід зауважити, що роботи [3,7,8] були виконані за ідеєю і під науковим керівництвом проф. В.В. Куліша.

#### АННОТАЦІЯ

Крутько О.Б. Нелинейная самосогласованная теория релятивистских параметрических систем со скрещенными поперечными периодически-реверсивными электрическим и магнитным полями. Диссертация ( рукопись ) на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.04. - физическая электроника, Сумский государственный университет, Сумы, 1995.

Защищается 9 научных работ, которые содержат теоретическое исследование параметрически-резонансного взаимодействия релятивистских электронных потоков с скрещенными поперечными периодически реверсивными электрическим и магнитным полями. На основе этого исследования предложен ряд новых схем и конструкций ЛСЭ убитронного типа, в том числе и высокоэффективных изохронных моделей. Построены нелинейные теории этих приборов. Применительно к ЛСЭ разработана новая расчетная схема применения метода усредненного кинетического уравнения с двукратным усреднением. Предложены принципиально новые модель, схема и конструкция периодически-реверсивного индукционного ускорителя и построена его нелинейная самосогласованная теория. Пказано, что такие ускорители обладают

свойством зарядовой инвариантности и, следовательно, могут быть использованы для ускорения потоков плазмы, в том числе и квазинейтральной.

Произведена апробация результатов работы на Международных конференциях.

Ключові слова

самоузгоджена нелінійна теорія, параметричні ЛВЕ, поперечно-реверсивні електричне і магнітне поля, індукційний прискорвач.

ABSTRACT

Oleg B. Krutko. The non-linear self-consistent theory of the relativistic parametric systems with the crossed transversal periodical reversed electric and magnetic fields.

The dissertation ( manuscript ) for the obtaining of the scientific degree of the candidate of science in the mathematics and physics corresponding to the speciality 01.04.04. - physical electronics, Sumy State University, Sumy, 1995.

9 scientific works are defended. They works contain the theoretical investigations of the parametric resonance interaction between the relativistic electron beam and the crossed transversal periodical reversed electric and magnetic fields. On the base of those investigations it has been proposed few of new models, schemes and constructions the EH-ubitron type FEL including the high effective isochronical models. The non-linear theory of this devices has been built. It was elaborated the new calculation scheme of using the method of the averaging kinetic equation with the double averaging for the FEL non-linear theory. It has been proposed the principle new model, scheme and construction of the periodical reversed inductional accelerator and the non-linear self-consistent theory of this device was built. It was shown that this accelerator has the quality of the charged invariability and as consequence capable of acceleration the beams of the plasma including the quasi neutral plasma beams.

The results of the work was presented in the international conferences.

Крутько Олег Борисович

НЕЛІНІЙНА САМОУЗГОДЖЕНА ТЕОРІЯ РЕЛЯТИВІСТСЬКИХ  
ПАРАМЕТРИЧНИХ СИСТЕМ ЗІ СХРЕШЕНИМИ ПОПЕРЕЧНИМИ  
ПЕРІОДИЧНО-РЕВЕРСИВНИМИ ЕЛЕКТРИЧНИМ  
І МАГНІТНИМ ПОЛЯМИ

Відповідальний за випуск  
Куліш Віктор Васильович

---

Підписано до друку 9.10.95  
Формат паперу 60 × 90 1/16  
Умовн. друк. арк. 0.75  
Тираж 100 прим.

---

СумДУ. 244007, Суми, вул. Римського-Корсакова, 2

---

Друкарня ВО "Електрон"  
244007, Суми, ул. Римського-Корсакова, 2

445885

