

УДК 621.384.2

В 381.13

¹В.В. Куліш, д-р фіз.-мат. наук
²І.В. Губанов, канд. фіз.-мат. наук
³І.Г. Майорников

БАЗОВІ СХЕМИ І ЗАГАЛЬНІ ПРИНЦИПИ РОБОТИ ОНДУЛЯТОРНИХ ІНДУКЦІЙНИХ ПРИСКОРЮВАЧІВ (ЕН-ПРИСКОРЮВАЧІВ)

Аерокосмічний інститут НАУ,

e-mail: ¹kulish2001@ukr.net; ²gubanov@gala.net; ³majornikov_i@mail.ru

Описано принцип дії ондуляторних індукційних прискорювачів (ЕН-прискорювачів). Наведено їх класифікацію і короткий опис найбільш характерних схем.

Вступ

Загальна ідея ондуляторних індукційних прискорювачів (ЕН-прискорювачів) заряджених частинок вперше була сформульована в праці [1]. Кількісний аналіз підтвердив технологічну можливість практичної реалізації ЕН-прискорювачів [2]. Перші експерименти з ЕН-прискорювачем, проведені проф. Петером Коселем (Університет Цінцінати, США), довели реальність базових фізичних механізмів і практичну можливість створення на їх основі особливо компактних прискорювальних систем. Експерименти було проведено як доведення технологічної можливості реалізації конструкцій ЕН-прискорювачів, заявлених патентом [3].

Розгляданню базових схем ЕН-прискорювачів присвячена дана стаття.

Загальні особливості і властивості ЕН-прискорювачів

ЕН-прискорювачі, бетатрони і лінійні індукційні прискорювачі (ЛП) належать до класу індукційних прискорювачів [4-7]. Для ілюстрації загальних принципів роботи та конструкції ЕН-прискорювачів проведемо короткий порівняльний аналіз систем даного класу.

Характерні форми траєкторій частинок у бетатроні, ЛП та ЕН-прискорювачі показано на рис. 1. З рис. 1, а видно, що заряджена частинка бетатрона циклічно рухається по кругоподібній (криволінійній) майже замкнутій траєкторії. Це означає, що на різних стадіях процесу прискорення різні частинки проходять один і той же прискорювальний канал багато разів.

З одного боку, дана обставина забезпечує головне достоїнство бетатронів – порівняно малі (для систем даного класу енергій) габарити, тобто відносну компактність. Пояснення цього факту полягає в тому, що тут загальна довжина траєкторії частинки L_{eff} виявляється багато більшою, ніж характерний розмір прискорювального каналу і, отже, ніж характерний розмір прискорювача L як цілого.

З іншого боку, ця ж причина обумовлює і головний недолік бетатронів, зв'язаний із тим, що в процесі прискорення банчу заряджених частинок енергія останніх повільно змінюється в часі. А це, у свою чергу, вимагає відповідної синхронної динамічної перебудови параметрів системи, тобто параметрів магнітного поля.

Одним із традиційних шляхів подолання зазначених труднощів є розробка концепції ЛПП (рис. 1, б) [5-7].

Конструкція ЛПП має лінійне ранжування, що, у свою чергу, обумовлює лінійну форму траєкторії частинки, яка прискорюється. Іншими словами, на відміну від бетатрона траєкторія частинки в цьому випадку виявляється незамкненою.

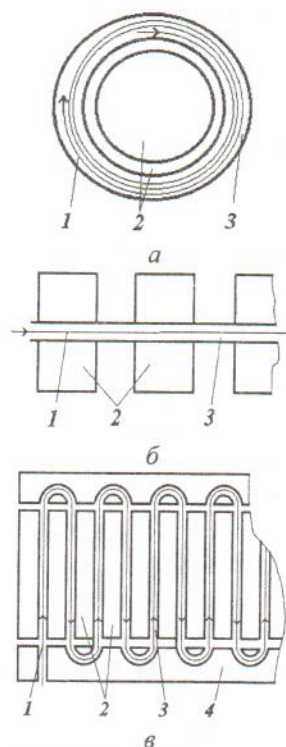


Рис. 1. Траєкторія зарядженої частинки в прискорювальному каналі бетатрона (а), ЛПП (б), ЕН-прискорювача (в):

1 – траєкторія електрона; 2 – електромагнітна прискорювальна система; 3 – прискорювальний канал; 4 – поворотна система

Тобто кожна частинка проходить будь-який поперечний переріз прискорювального каналу тільки один раз. Це автоматично вирішує проблему часової динамічної синхронізації параметрів системи.

Ця сама обставина породжує і певні недоліки, що властиві тільки ЛПП. Головний з них – надмірні лінійні габарити системи в цілому. Наприклад, широковідомий ЛПП, побудований у Ліверморській лабораторії, характеризувався довжиною близько 70 м при енергії близько 50 МеВ [8–11].

Ондуляторні індукційні прискорювачі (рис. 1, в) займають проміжне положення між бетатронами і ЛПП.

З одного боку, подібно до бетатронів і ЛПП одночасно вони містять спеціальний індуктор для генерації вихрового електричного поля в каналі. Причому, як і у випадку бетатрона, траєкторії частинок, що прискорюються, є криволінійними. Як наслідок, загальна довжина траєкторії частинки L_{eff} є багато більшою, ніж поздовжній габарит прискорювального модуля L , тобто характерного розміру.

З іншого боку, траєкторії частинок у каналі ЕН-прискорювача є незамкнутими. Це все дозволяє уникнути характерних як для бетатронів, так і для ЛПП технологічних проблем.

Отже, характерною рисою будь-якого ЕН-прискорювача є ондуляторна (синусоподібна, спіральна і т.д.) форма траєкторії частинки, що прискорюється. ЕН-прискорювач можна розглядати як ЛПП, “стиснутий у гармошку” (рис. 1, б) або “скручений у спіраль”.

Така асоціація полегшує розуміння суті справи, але вона не повинна сприйматися буквально.

Класифікація ЕН-прискорювачів

Насамперед, класифікуємо ЕН-прискорювачі за особливостями конфігурації полів, які генеруються в прискорювальному каналі системи. За критерієм “метод генерації полів” усі ЕН-прискорювачі можемо умовно розбити на такі класи:

- системи зі стаціонарними (квазістаціонарними) ЕН-полями (за час руху банчу в прискорювальному каналі характеристики полів залишаються практично сталими);
- системи з нестаціонарними ЕН-полями (зворотна ситуація);
- змішані системи.

У свою чергу, кожний із цих класів може бути розбитий на більш часткові підкласи:

- системи з залежними методами генерації електричного і магнітного полів, наприклад, конструкції, в яких магнітне поле в робочому

каналі змінюється в часі і служить джерелом для вихрового електричного поля;

- системи з незалежними методами генерації електричного і магнітного полів, наприклад, конструкція, в якій електричне і магнітне поля в каналі генеруються шляхом використання незалежних елементів конструкції;

- системи змішаного типу.

Серед зазначених підкласів ЕН-систем можемо окремо виділити системи, в яких реалізується просторова суперпозиція схрещених ондуляторних електричного і магнітного полів, і системи з полями, що просторово не перекриваються.

Характерною рисою ЕН-прискорювачів є ондуляторний характер траєкторій частинок у прискорювальному каналі. Така форма траєкторії завжди може бути забезпечена у випадку використання, наприклад, ондуляторних полів. Однак ондуляторна форма траєкторії може бути реалізована також і в полях неондуляторної природи, наприклад, в аксіальному квазіоднорідному магнітному полі. За критерієм “тип формувального магнітного поля” можемо додатково розбити ЕН-прискорювачі на системи з ондуляторними магнітними полями і на системи з неондуляторними полями, які, однак, забезпечують ондуляторні траєкторії частинок. Електричні вихрові поля у ЕН-прискорювачів усіх типів завжди є ондуляторними.

У свою чергу, ЕН-прискорювачі з ондуляторними полями можуть бути класифіковані за типом поляризації на такі системи:

- лінійно-поляризовані;
- циркулярно-поляризовані;
- еліптично-поляризовані.

За особливостями ранжування конструкції можемо виділити однорівневі і багаторівневі (дворівневі, триврівневі і т.д.) системи. За критерієм “функціонального призначення” розрізняємо:

- власне прискорювачі;
- системи ефективного охолодження пучків заряджених частинок;
- системи формування пучків.

Отже, з конструктивного погляду на сьогодні ЕН-прискорювачі утворюють новий вельми широкий і різноманітний клас прискорювальних систем.

Принцип дії ЕН-прискорювачів

Через наявні конструктивні відмінності кожен із типів ЕН-прискорювачів має свої специфічні фізичні особливості. Це стосується, зокрема, і специфіки механізмів прискорення, що реалізуються.

Одночасно можна з'ясувати, що всі механізми такого роду характеризуються певними схожими рисами.

Тому для одержання загальної уяви про механізм прискорення в ЕН-прискорювачах досить розглянути хоча б один із них. За такий виберемо найпростіший, що реалізується в нестационарних лінійно-поляризованих ЕН-прискорювачах із просторовою суперпозицією вихрового електричного та магнітного полів. Конструкція такого типу показана на рис. 2, де для простоти наведено тільки два періоди прискорювального модуля. Більш детально принцип дії цієї системи проілюстровано на рис. 3, 4.

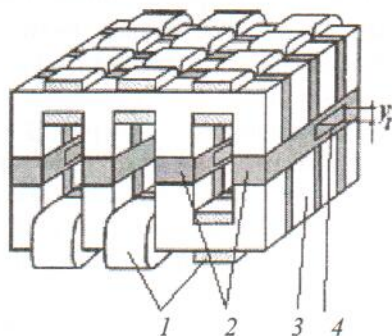


Рис. 2. Приклад конструкції прискорювального модуля нестационарного лінійно-поляризованого ЕН-прискорювача з просторовою суперпозицією схрещених вихрового електричного і магнітного полів (два періоди системи):

1 – котушки електромагніта; 2 – керамічні вставки; 3 – феритові осердя електромагніта; 4 – вікно для проходу банчу

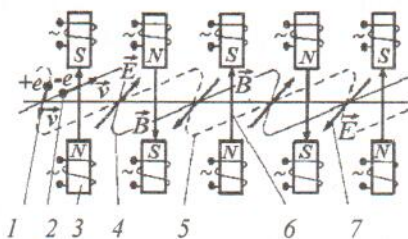


Рис. 3. Траєкторія руху заряджених частинок у прискорювальному каналі:

1 – позитивно заряджена частинка; 2 – негативно заряджена частинка; 3 – полюси електромагніта; 4 – траєкторія руху негативно зарядженої частинки ($-e$); 5 – траєкторія руху позитивно зарядженої частинки ($+e$); 6 – вектор індукції нестационарного магнітного поля; 7 – силові лінії вихрового електричного поля \vec{E} , що генерується нестационарним магнітним полем; 8 – електронний пучок

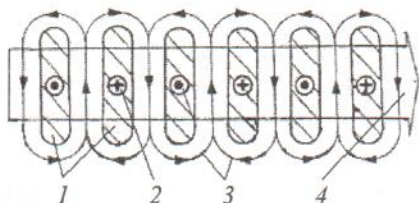


Рис. 4. Схема формування суперпозиції схрещених ондуляторних електричного і магнітного полів (горизонтальна проекція):

1 – полюси електромагніта; 2 – вектор індукції нестационарного магнітного поля; 3 – силові лінії вихрового електричного поля \vec{E} , що генерується нестационарним магнітним полем; 4 – електронний пучок

На перший погляд конфігурація зазначеної системи збігається з добре відомими магнітоондуляторними (Н-убітронними) системами накачування лазерів на вільних електронах [1; 8–10]. Але при уважному розгляді неважко виявити і деякі принципові відмінності. Головне з них полягає в тому, що в даній ЕН-системі осердя електромагнітів (рис. 2, позиція 1) виготовлено зі спеціального прискорювального фериту чи магнітного аморфного матеріалу. Живлення котушок електромагнітів здійснюється від джерела пилкоподібного або іншої форми імпульсного струму зі спектром частот у діапазоні 1–100 МГц. Як наслідок, між полюсами генерується змінне в часі ондуляторне магнітне (Н-убітронне) поле (рис. 3, позиції 4, 5). Відповідно за рахунок реалізації ефекту електромагнітної індукції в системі, в свою чергу, генерується вихрове ондуляторне (Е-убітронне) електричне поле (рис. 3, позиція 2).

Неважко бачити, що результуюче електромагнітне (ЕН-ондуляторне) поле виявляється схрещеним. Вектор напруженості електричного поля \vec{E} в будь-якій точці об'єму каналу є перпендикулярним вектору індукції магнітного поля \vec{B} .

Причому фази коливань H - і E -компонентів результуючого ЕН-поля зміщені один відносно одного на чверть періоду ондуляції.

Більш наочно формування ЕН-поля в площині, яка перпендикулярна вектору \vec{B} , показано на рис. 3. Легко бачити, що в проміжках між полюсами вектори напруженості електричних полів, які генеруються різними парами полюсів електромагнітів, завжди складаються з позитивним знаком. Аналогічна ситуація відбувається у всіх інших типах ЕН-прискорювачів.

Динаміку процесу прискорення заряджених частинок в ЕН-прискорювачі зазначеного типу показано на рис. 4, де заряджена частинка рухається одночасно як під дією електричної

$$\vec{F}_{eL} = q\vec{E}, \quad (1)$$

так і магнітної сил Лоренца

$$\vec{F}_{mL} = \frac{q}{c} [\vec{v}\vec{B}], \quad (2)$$

де q – заряд; \vec{v} – вектор лінійної швидкості частинки; \vec{E} – вектор напруженості електричного поля; \vec{B} – вектор індукції магнітної компоненти ЕН-поля; c – швидкість світла у вакуумі.

Завдяки ондуляторній природі магнітного поля як електрон (рис. 4), так і іон рухаються в прискорювальному каналі під дією сил (1), (2) по синусоподібним (ондуляторним) траєкторіям. Причому рух частинок уздовж поздовжньої (ак-

сіальної) осі системи z на відміну від ситуації, що відбувається в ЛПП, має той самий напрям.

У поперечній площині (перпендикулярній вектору \vec{B} та осі z) коливальні рухи частинок обох типів заряду характеризуються зсувом фаз, який дорівнює π . Іншими словами, у поперечній площині частинки протилежного знака завжди рухаються у взаємно зустрічних напрямках, тобто аналогічно тому, як це відбувається в ЛПП у поздовжній осі. Як наслідок, і електрони, і іони в ЕН-прискорювачі прискорюються в поперечній площині під дією того самого вихрового електричного поля (рис. 3).

Отже, аналогія ЛПП з ЕН-прискорювачами полягає в тому, що в обох випадках електрони й іони прискорюються під дією вихрового електричного поля у взаємно протилежних напрямках. У той же час основною відмінністю є те, що у випадку ЛПП таке прискорення відбувається в поздовжньому (аксіальному) напрямку, тоді як в ЕН-прискорювачах прискорення частинок здійснюється в поперечній площині. При цьому в поздовжньому напрямку, як правило, діють лише градієнтні сили типу:

$$\vec{F}_{gr} \sim (\vec{\nabla} \vec{B}_m), \quad (3)$$

де \vec{B}_m – амплітуда ондуляцій магнітної компоненти ЕН-поля.

За рахунок сил типу (3) може, зокрема, якщо це передбачено конструкцією, здійснюватися повна або часткова трансформація кінетичної енергії поперечних коливань в енергію поступального руху частинок.

Як і у випадку бетатрона, ефективна довжина траєкторії в ЕН-системі L_{eff} може істотно перевищувати характерний розмір (наприклад, довжину) прискорювача L . Відповідно робота вихрового електричного поля з прискорення частинки

$$A_{EH} = q \int_0^{L_{eff}} (\vec{E} \vec{n}_v) dz$$

в ЕН-прискорювачах за інших рівних умов виявляється помітно більшою, ніж у випадку ЛПП ($\vec{n}_v = \vec{v}/|\vec{v}|$). Крім того, ЕН-ондуляторні поля мають природну здатність до фокусування пучків заряджених частинок (ефект жорсткого фокусування [11–13]), що дозволяє вирішити проблему транспортування пучка частинок у прискорювальному каналі.

Отже, головною технологічною перевагою ЕН-ондуляторних систем є можливість створення на їх основі компактних джерел релятивістських пучків.

Висновки

У статті обкреслено основні типи нового класу пристроїв – ондуляторних індукційних прискорювачів (ЕН-прискорювачів).

Якісний аналіз дозволяє побачити досить широкий спектр можливих практичних застосувань ЕН-прискорювальних систем, завдяки потенційній компактності.

До систем цього класу, в яких властивість компактності відіграє ключову роль, насамперед, належать мобільні, зокрема, бортові системи різного призначення (пересувні експрес-лабораторії, мобільні системи для моніторингу навколишнього середовища тощо).

Крім цього, як показує попередній проектний аналіз, розробка електронних ЕН-прискорювачів проміжної енергії (від сотень кілоелектрон-вольт до десятків мегаелектрон-вольт) є найбільш ефективним шляхом вирішення головної проблеми лазерів на вільних електронах. Цей самий аналіз показав, що ще більш вражаючих результатів можна досягти на шляху переходу від використання традиційної однопучкових схем [5; 9–11] до двопучкових (супергетеродинами) схем лазерів на вільних електронах [9–20].

На базі двопотокових двопучкових лазерів на вільних електронах на основі ЕН-прискорювачів може бути побудовано, наприклад, пересувні дослідницькі комплекси-лабораторії, бортові системи для моніторингу навколишнього середовища тощо.

Список літератури

1. Кулиш В.В. Физика лазерів на свободних електронах. Основные положения. – К., 1990. – С. 192. Деп. в Укр. НИИТИ 05.09.90. № 1526. Ук-90.
2. Кулиш В.В., Крутько О.Б. Ускорение заряженных частиц в скрещенных периодически реверсивных электрическом и магнитном полях // Письма в ЖТФ. – 1995. – Т. 21, № 9. – С. 52–55.
3. United States Patent № US 6,433,494. – В1. Inductional undulative EN-accelerator // V.V. Kulish, P.B. Kosel, A.C. Melnyk, N. Kolcio. Date of the Patent August 13, 2002. – Appl. № 09/551.762. – Filed April 18. – 2000.
4. Dikansky N.S., Pestrikov D.V. The physics of intensive beams and storage rings // New York. – AIP Press. – 1994. – P. 24–35.
5. Артюх И.Г., Камальдинова Г.Ш., Саидалов А.Н. Лазеры на свободных электронах. Ч. 2. Эксперименты по созданию ЛСЭ-генераторов и усилителей. Мощные СВЧ-приборы для ускорительной техники // Обзоры по электронной технике. Сер. 1. Электроника СВЧ // М.:ЦНИИ «Электроника», 1988. – Вып. 11 (1381). – С. 43–56.

6. Pasour J.A., Lucey R.F., Robertson C.W. Long pulse free electron laser driven by a linear induction accelerator // Proc. SPIE. – 1984. – Vol. 28. – P. 453–455.
7. High current, high voltage accelerator as free electron laser drivers / C.W. Robertson, J.S. Pasour, C.A. Kapetanakis e.a. // Physica of Quant. Electr. – 1982. – Vol. 8. – P. 728–730.
8. Brau C. Free electron laser // Boston. – Academic Press, 1990. – 354 p.
9. Luchini P., Motz U. Undulators and free electron lasers // Oxford, Clarendonpress, 1990. – 384 p.
10. Быстров Ю.А., Иванов С.А. Ускорительная техника и рентгеновские приборы. – М.: Высш. шк., 1983. – 424 с.
11. Compact electron EH-accelerator for intensive X-ray flash source / V.V. Kulish, P.B. Kosel, N. Kolcio e.a. // Proc. of SPIE. – 1999. – Vol. 3771. – P. 30–43.
12. Пат. №14547А Украина, МКИ Н 01 J 25/00. Лазер на свободных электронах / В.В. Кулиш, А.Г. Кайлюк, А.А. Квак, О.Б. Крутько. Приоритет от 19.12.96. – №95031123; Заявл. 10.03.95; Опубл. 09.01.97.
13. Кулиш В.В. К теории супергетеродинных лазеров на свободных электронах клистронного типа // Укр. физ. журн. – 1991. – Т. 36, № 1. – С. 28–33.
14. Болонин О.Н., Кулиш В.В., Пугачов В.П. Супергетеродинное усиление электромагнитных волн в системе двух релятивистских электронных потоков // Укр. физ. журн. – 1988. – Т. 33, №10. – С. 1465–1468.
15. Bolonin O.N., Kulish V.V., Kohmanski S.S. Coupled parametric resonances // Acta Physica Polonica. – 1989. – Vol. A67, № 3. – P. 455–473.
16. Кулиш В.В., Пугачов В.П. К теории эффекта супергетеродинного усиления волн в плазме двухпотоковой системы // Физика плазмы. – 1991. – Т. 17, № 6. – С. 696–705.
17. Кулиш В.В. К теории релятивистских параметрических электронно-волновых лазеров на свободных электронах // Укр. физ. журн. – 1991. – Т. 36, № 5. – С. 686–693.
18. Кулиш В.В. Физика двухпотоковых ЛСЭ // Вестн. МГУ. Физика–астрономия. – 1992. – Т. 33, № 3. – С. 64–78.
19. Kulish V.V. Superheterodine electron wave free electron laser // The intern. jornal of infrared and Millimeter waves. – 1993. – Vol. 14, № 3. – P. 451–568.
20. Kulish V.V., Kuleshov S.A., Lysenko A.V. Non-linear selfconsistent theory of superheterodine free electron laser // The intern. jornal of infrared and Millimeter waves. – 1994. – Vol. 15, № 1. – P. 24–78.

Стаття надійшла до редакції 16.04.03.

В.В. Кулиш, И.В. Губанов, И.Г. Майорников

Базовые схемы и общие принципы работы ондуляторных индукционных ускорителей (EH-ускорителей)

Описан принцип работы ондуляторных индукционных ускорителей (EH-ускорителей). Приведены их классификация и краткое описание наиболее характерных схем.

V.V. Kulish, I.V. Gubanov, I.G. Majornikov

Schemes and constuctions of the undulation induction accelerators (EH-accelerators)

In this paper the qualitative analysis of the undulation induction accelerators (EH-accelerators) work principles has been prepared. It's classification and short description of typical construction has been adduced.