

УДК 533.951

PACS number(s): 52.30.-q

## КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ ЕЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В СТАЦІОНАРНОМУ ОНДУЛЯТОРНОМУ ЕН-ПРИСКОРЮВАЧІ

І. Губанов, А. Брусник

*Національний авіаційний університет, кафедра теоретичної фізики  
просп. К. Комарова 1, К-126 Київ, Україна  
e-mail: [gubanov@gala.net](mailto:gubanov@gala.net), [gubanov@utasco.com](mailto:gubanov@utasco.com)*

Розглянуто новий тип прискорювачів заряджених частинок – ондуляторний індукційний прискорювач (ЕН-прискорювач). Розраховано електромагнітні поля в області взаємодії цього прискорювача. Представлені результати комп'ютерного моделювання динаміки електронного пучка в області взаємодії ЕН-прискорювача. Сформульовано основні параметри окремих блоків прискорювача для його експериментальної реалізації. Показано, що використання запропонованої ондуляторної схеми дає підстави створювати компактні ефективні прискорювачі заряджених частинок.

*Ключові слова:* ондуляторний прискорювач, електронний пучок, квазінейтральна плазма.

Ондуляторні індукційні прискорювачі (ЕН-прискорювачі) електронів, побудовані на ондуляторному принципі прискорення [1–3], тобто траєкторія електронів у прискорювальному тракті є синусоподібною кривою. Завдяки цьому загальна довжина траєкторії, і як результат кінетична енергія електронів на виході, виявляється значно більшою, ніж у відомих прискорювальних системах [4–6], в яких електрони прискорюються по прямій. Це, дає змогу побудувати систему, яка буде значно компактнішою за тих самих параметрів електронного пучка на виході, ніж відомі аналоги. Ідея цієї роботи належить проф. В.В. Кулішу.

Але виграш за габаритами досягається ціною ускладнення динаміки електронного пучка і, відповідно, ускладнюється система коригування електронним пучком та забезпечення стійкого руху пучка в області взаємодії. Перший крок до створення ефективної системи, яка б забезпечувала стійкий рух електронного пучка – детальний аналіз динаміки електронного пучка в області взаємодії.

У цій роботі розглянено стаціонарний лінійно-поляризований ондуляторний індукційний прискорювач (стаціонарний ЕН-прискорювач (див. рис. 1)). Область взаємодії цього прискорювача складається з прямолінійних прискорювальних каналів (позиція 2) та поворотних систем (позиція 3), що передають пучок з каналу в канал (позиція 1). Основною проблемою, яка виникає під час реалізації електронного ЕН-прискорювача, це збереження форми електронного пучка у разі його транспортування через прискорювальний канал і переході від одного прискорювального каналу (позиція

4, 5 рис. 2) до іншого через поворотні магніти (позиція 6 рис. 2). Кількісно проаналізуємо рух електронного пучка в каналі прискорювача, схему якого наведено на рис. 2.

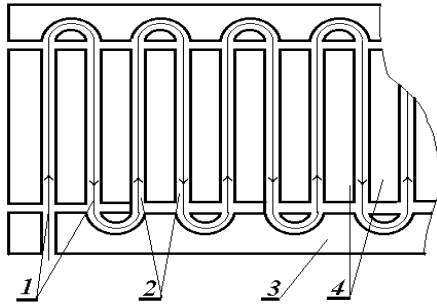


Рис. 1. Траєкторія частинки в каналі ЕН-прискорювача (лінійно-поляризований стаціонарний ЕН-прискорювач з незалежним методом генерації електричного і магнітного полів і просторово розділеними областями електричного і магнітного ондуляторних полів): 1 – траєкторія частинки; 2 – прискорювальний канал; 3 – поворотні системи; 4 – індуктори

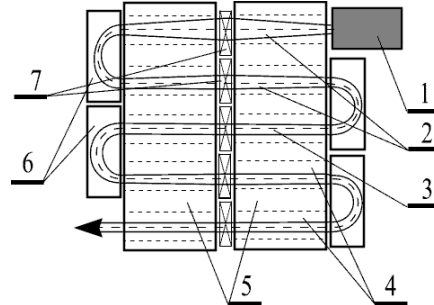


Рис. 2. Схема проводки пучка для однорівневої моделі ЕН-прискорювача: 1 – електронна гармата; 2 – пучок; 3 – траєкторія реперної частинки, тобто частинки координата якої визначається як середня по всіх частинках; 4 – прискорювальні канали; 5 – прискорювальні блоки; 6 – поворотні магніти; 7 – магнітні лінзи

Прискорювальну секцію ЕН-ондулятора будемо за аналогією з прискорювальною секцією лінійного індукційного прискорювача (ЛІП) [5]. Розподіл електричного поля в області взаємодії, аналізований в рамках методу інтегральних рівнянь, описано в [7, 9, 10] засвідчив, що в поперечному перетині електричне поле має достатній ступінь просторової однорідності (рис. 3, а), його напруженість, за умови використання сучасних магнітомагнітних матеріалів, приблизно дорівнює  $\sim 1,5$  MV/m та вище. На рис. 3, б показані залежності поздовжньої (прискорювальної) і поперечної компонент електричного поля від поздовжньої координати.

Як поворотні системи у даному комп'ютерному експерименті були використані панцирні поворотні магніти з електричним підмагнічуванням та додатковим коригуванням. Спочатку аналізували магнітні системи без екрану (безпанцирні поворотні магніти). Було з'ясовано, що практичне використання безпанцирних магнітів у ЕН-прискорювачах можна вважати недоцільним. Це пояснюють сильною неоднорідністю в усій області повороту пучка поперечної  $y$ -компоненти магнітного поля, що генеруються у поворотних магнітах. Вплив поля на рух електронного пучка відчувається далеко за межами об'єму, обмеженого полюсами магніту, причому вплив "хвостів" поля за межами магніту може бути того ж порядку, що і вплив "основного" поля між полюсами.

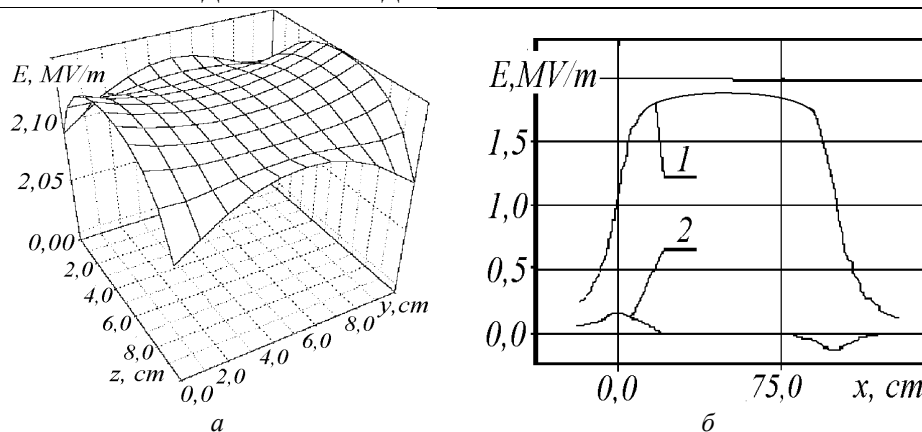


Рис. 3. Поперечний розподіл поздовжнього прискорювального електричного поля (а) та залежність поздовжньої (крива 1) і поперечної (крива 2) компонент напруженості електричного поля від поздовжньої координати (б). Розрахункові параметри наведені в табл. 1

Крім поперечної (вертикальної)  $y$ -компоненти поля також генеруються горизонтальні  $x$ -ова та  $z$ -ова компоненти, і, як показав аналіз руху пучка при повороті в такому полі, саме наявність горизонтальної компоненти є одним із головних чинників ефекту розсіювання пучка.

Таблиця 1

Параметри прискорювального блоку

Параметри	Значення
Довжина прискорювального каналу (2 секції) ( $L$ )	100×2 см
Ширина індукційного каналу ( $l_1+2\cdot d$ )	8 см
Товщина феритових стінок ( $d$ )	4 см
Висота прискорювального каналу ( $l_2-2\cdot d_1$ )	8 см
Максимальна сила пилкоподібного струму ( $I_1=I_2=I$ )	300 А
Тривалість пилкоподібного імпульсу ( $\tau$ )	300 нс
Магнітна індукція насичення	4200 Gs
Напруженість електричного поля в каналі	~1,7 МВ/м

Розсіювання зумовлене тим, що під час повороту пучок рухається поперек цієї компоненти. Остання ж міняє знак при переході через площину симетрії поворотної системи. При цьому грає роль не стільки факт наявності цієї компоненти, скільки її просторова "розтягнутість" і, відповідно, присутність в околі точки реверса. Як було з'ясовано, наявність  $z$ -компоненти зумовлена поперечною обмеженістю полюсів магніту (по осі  $z$ ). Для того, щоб уникнути розсіювання пучка при повороті було запропоновано використовувати магнітні системи з екраном (панцирні поворотні магніти). Конструкція такого магніту представлена на рис. 4, а. На рис. 4, б наведений ескіз половини магнітного екрану.

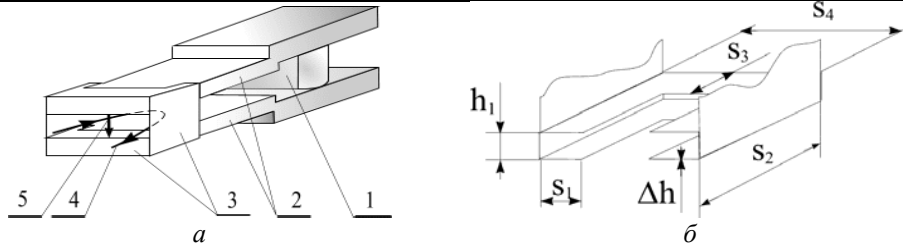


Рис. 4. Ескіз поворотного магніту з екраном (а) та ескіз половини магнітного екрану (б): 1 – котушка електромагніту; 2 – магнітопровід; 3 – магнітні екрани; 4 – траєкторія частинки; 5 – вектор індукції магнітного поля

Параметри поворотного магніту наведені в таблиці 2.

Таблиця 2

Тип системи	Магніт
Геометричні розміри магніту	50×10×40 см
Відстань від фокусуючої лінзи до магніту	6 см
Максимальна індукція магнітного поля магніту	5 кГс

На рис. 5 наведені розподіли магнітного поля поворотного магніту без екрану (а) та з екраном (б), відповідно.

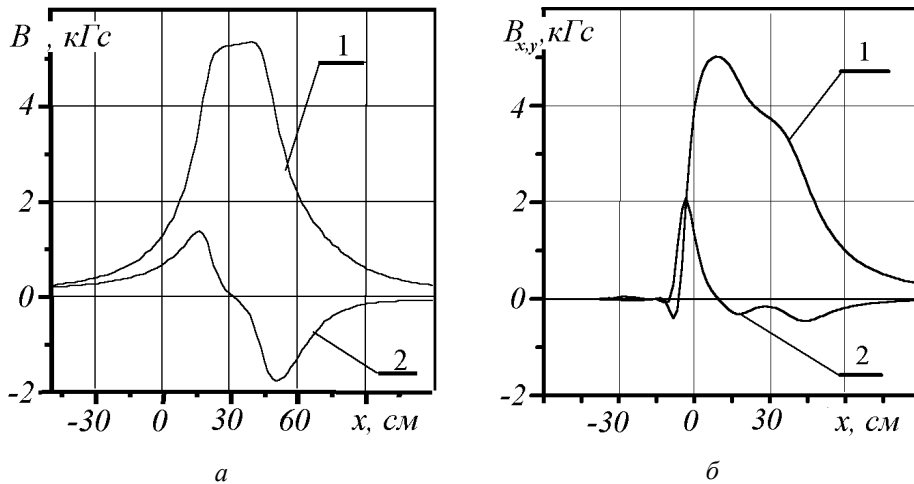


Рис. 5. Просторова конфігурація у-ової (крива 1) і х-ової (крива 2) компонент магнітного поля у поворотному магніті без (рис., а) та з (рис., б) магнітним екраном:  $x=0$  – межа магніту

Розрахунки розподілу магнітного поля проводилися в рамках методу вторинних джерел [9].

Для утримання пучка в області взаємодії в системі було використано систему тонких електромагнітних лінз. Ескіз такої лінзи наведений на рис. 6, а. Основною перевагою електромагнітних лінз є можливість плавної зміни магнітного поля у робочому зазорі у великих межах. На рис. 6, б наведено розподіл поперечної компоненти магнітного поля залежно від параметрів системи. Параметри лінз, що були використані в комп'ютерному експерименті наведені в табл. 3.

Таблиця 3

Параметри	Величина
S	3 см
D	10 см
I	5-7 А
h	2-3 мм
Діаметр дроту	1 мм

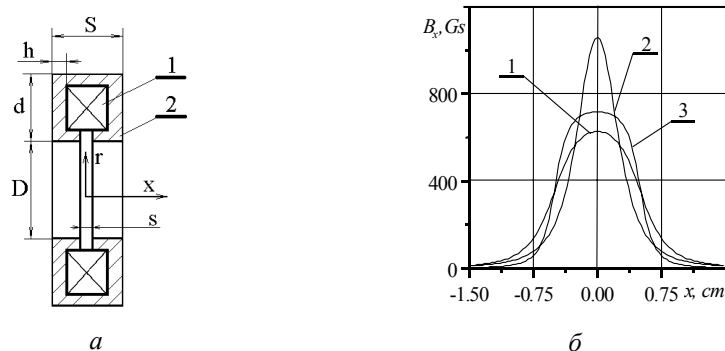


Рис. 6. Конструкція тонкої магнітної фокуруючої лінзи (а) та Розподіл магнітного поля тонкої лінзи залежно від різних параметрів: 1 – котушка (шпуля); 2 – екран;  $r = \sqrt{y^2 + z^2}$ , число ампер-витків  $IN=600$  А, крива 1 –  $s=4$  см, крива 2 –  $s=2$  см, крива 3 –  $s=1$  см

Розрахунки динаміки електронного пучка в області взаємодії проводили в рамках моделі великих частинок [10]. З метою аналізу взаємодії між окремими частинками пучка використовували модель заряджених куль [8–10]. Для подальших пояснень введемо поняття “реперна частинка”. Отже, реперною частинкою називатимемо таку частинку, координати якої у будь-якому поперечному перерізі пучка визначають як середнє по всіх частинках, що потрапляють у переріз. Траєкторію реперної частинки у магнітах показано на рис. 7.

На рис. 8 показано залежність ширини пучка в горизонтальній (а) та вертикальній (б) площинах від довжини траєкторії реперної частинки.

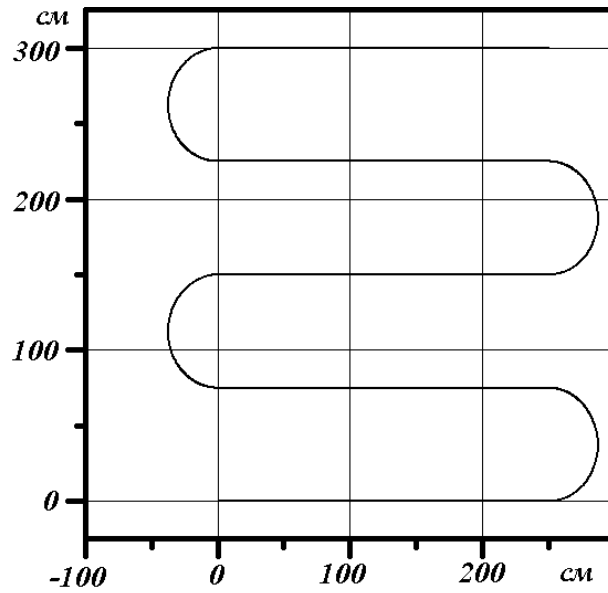


Рис. 7. Траєкторія реперної частинки у площині XOY магніту з екраном

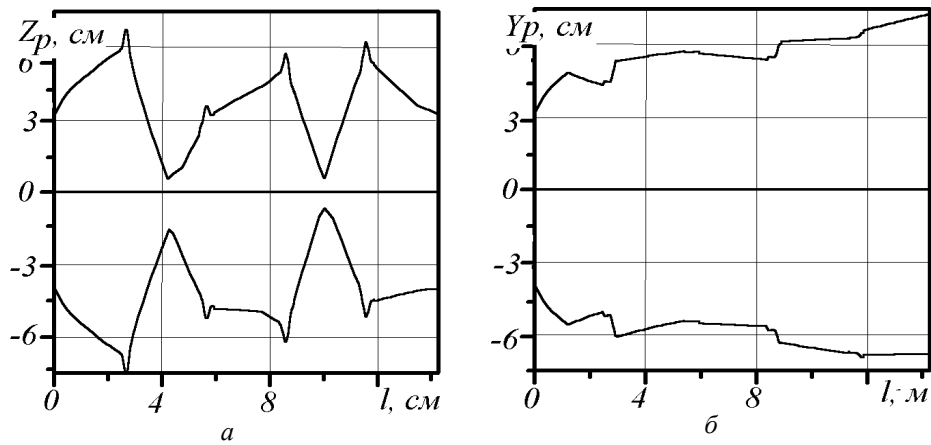


Рис. 8. Залежність ширини пучка в горизонтальній (а) та вертикальній (б) площинах від довжини траєкторії реперної частинки. Однорівневий ЕН-прискорювач (рис. 2)

Розрахунки динаміки електронного пучка проводили при параметрах, показаних у табл. 4.

Таблиця 4

Параметри	Величина
Середня енергія пучка, кеВ	450
Енергетичний розкид пучка, %	3
Діаметр пучка, мм	1–2
Кроссовер, см	20
Енергія пучка на виході, МеВ	17,5

Як показав проведений аналіз, використання ондуляторної схеми компоновки дає змогу створити компактний потужний прискорювач електронних пучків. За результатами проведеного комп'ютерного моделювання електронний пучок проходить у прискорювальному каналі ондуляторного індукційного прискорювача (ЕН-прискорювача) з мінімальними втратами струму. Але при цьому потрібно враховувати, що успішна проводка пучка значною мірою залежить від чіткої системи керування та дотримання жорстких вимог щодо параметрів кожного з елементів конструкції.

Запропонований прискорювач може бути ефективно використаний у багатьох галузях науки і техніки, у тому числі як система стерилізації медичних препаратів, системи знезараження стічних та природних вод, системи для зварювання металевих конструкцій, обробки поверхонь тощо.

1. *Kulish V.V.* Hierarchy and asymptotic hierarchical methods in electrodynamics. Hierarchical methods. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht-Boston-London, 2002. Vol. 1. 380 p.
2. *Kulish V.V.* Undulative electrodynamic system. Hierarchical methods. Vol. 2. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht-Boston-London, 2002. 396 p.
3. *Kulish V.V., Melnyk A.C.* Multi-channel linear inductional accelerator of charged particles. Decision for the giving out of the Ukrainian declaration patent of July 26, 2001. Application N 20011020957 of February 13, 2001.
4. *Бистров Ю.А., Іванов С.А.* Прискорювальна техніка та рентгенівські прилади. М.: Вища школа, 1983.
5. *Вахрушин Ю.П., Анацький А.І.* Лінійні індукційні прискорювачі. М.: Атоміздат, 1978. 170 с.
6. *Рудаков Л.І.* та ін. Генерація та фокусування сильнострумівих релятивістських електронних пучків. М.: Атоміздат, 1990. 280 с.
7. *Давідсон Р.* Теорія зарядженої плазми: пер. з англ. М.: Мир, 1978. 216 с.
8. *Клімонтович Ю.Л.* Фізика безіткненої плазми // Укр. фіз. журн. 1997. Т. 167. № 1. С. 23–56.
9. *Сілад'ї В.М.* Електронна та іонна оптика. М.: Атоміздат, 1984.
10. *Молоковський С.І., Сушков А.Д.* Інтенсивні електронні та іонні пучки. М.: Енергоатоміздат, 1991. 303 с.

**COMPUTER MODELLING OF ELECTRON BEAM DYNAMICS INTO STATIONAR  
UNDULATOR EH-ACCELERATOR****I. Gubanov, A. Brusnik***National aviation university, theoretical physics department  
K. Komarova Str., 1, K-126 Kiev, Ukraine*

A new type of the accelerator of charged particles – the undulation inductional accelerator (EH-accelerator) has been presented in this paper. The calculation of the electromagnetic fields in the interaction area of this accelerator has been carried out. The results of the computer modeling of electron beam dynamics in the interaction area of the EH-accelerator have been presented. The general parameters of separate blocks of the accelerator have been formulated for its practical realization. It has been shown that the use of the proposed undulation scheme allows to create compact and effective accelerators of charged particles.

*Key words:* undulation, accelerator, electron beam, quasi-neutral plasma.

**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЭЛЕКТРОННОГО  
ПУЧКА В СТАЦИОНАРНОМ ОНДУЛЯТОРНОМ EH-УСКОРИТЕЛЕ****И. Губанов, А. Брусник***Национальный авиационный университет, кафедра теоретической физики  
просп. К. Комарова, 1, К-126 Киев, Украина*

Рассмотрен новый тип ускорителей заряженных частиц – ондуляторный индукционный ускоритель (EH-ускоритель). Рассчитаны электромагнитные поля в области взаимодействия этого ускорителя. Представлены результаты компьютерного моделирования динамики электронного пучка в области взаимодействия EH-ускорителя. Сформулированы основные параметры отдельных блоков ускорителя для его экспериментальной реализации. Показано, что использование предложенной ондуляторной схемы дает основания создавать компактные эффективные ускорители заряженных частиц.

*Ключевые слова:* ондуляторный ускоритель, электронный пучок, квазинейтральная плазма.

Стаття надійшла до редколегії 05.06.2008

Прийнята до друку 20.07.2009