

НАУКОВИЙ ФІЗИКО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ЦЕНТР
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ

На правах рукопису

Єфімов Сергій Володимирович

УДК 621.384.6

ВПЛИВ КРАЙОВИХ ПОЛІВ МАГНІТНИХ ЕЛЕМЕНТІВ НА
ДИНАМІКУ ПУЧКА В ЦИКЛІЧНИХ ПРИСКОРЮВАЧАХ ТА
НАГРОМАДЖУВАЧАХ ЗАРЯДЖЕНИХ ЧАСТОК

01.04.20 - фізика пучків заряджених часток

Автореферат дисертації
на здобуття вченого ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Харків - 1996

ДВ 33, 789

Роботу виконано у Національному науковому центрі Харківський фізико-технічний інститут (ННЦ ХФТІ)

НАУКОВИЙ КЕРІВНИК:

Карнаухов

Іван Михайлович

-доктор фізико-математичних наук,
професор, ННЦ ХФТІ, м.Харків

ОФІЦІЙНІ ОПОНЕНТИ:

Онщценко

Іван Миколаєвич

-доктор фізико-математичних
наук, ННЦ ХФТІ, м.Харків

Мирошниченко

Валентин Іванович

- доктор фізико-математичних
наук, Інститут прикладної фізики,
м.Суми

Провідна організація

- Харківський державний
університет, м.Харків

Захист дисертації відбудеться " 4 " липня 1996 р. о 15
годині на засіданні Спеціалізованої Ради Д 02.19.01 при Харківському
науковому фізико - технологічному центрі (м.Харків, вул. Новгородська,
1).

З дисертацією можна ознайомитися у Спеціалізованій Раді
Д 02.19.01.

Автореферат розіслано " 27 " травня

1996 р. ім. В. Стефаніка
АН України

Вчений секретар

Спеціалізованої Ради

Д 02.19.01

Handwritten signature

В. П. Дзмуцький

ЛНБ України ім.В.Стефаніка



00753708 (U)

Загальна характеристика роботи

Актуальність проблеми обумовлена необхідністю одержання прецизійних пучків в циклічних прискорювачах та накопичувачах для забезпечення сучасного рівня досліджень в ядерній фізиці, фізиці елементарних часток, досліджень на пучках синхротронного випромінювання (СВ), для ефективного використання пучків в прикладних цілях. Для одержання пучків високої якості необхідно враховувати фактори, що збуджують рух часток, за наслідок чого зростає ефективний емітанс пучка. Одним з таких факторів є крайові поля магнітних елементів прискорювачів. Звичайно під час розрахунків прискорювачів враховуються лише ефективна довжина магнітних елементів та лінійний зсув частоти вертикальних бетатронних коливань за наслідок крайових полів, що достатньо під час розробок крупних установок, довжина орбіти яких складає від сотен метрів до кількох кілометрів і, відповідно, орбіта в дипольних магнітах має великий радіус повороту, що складає десятки і сотні метрів. Останнім часом в світі розробляються та вводяться в дію компактні накопичувачі - джерела СВ, в яких застосовуються надпровідні магніти з малим радіусом кривизни. В таких установках вплив крайових полів на динаміку пучка може бути помітним. Крайові ефекти можуть стати фактором, що обмежує застосування так званих вставок - віглерів та ондуляторів - пристроїв з великою кількістю магнітів з поляристю, що чергуються. Також треба враховувати крайові поля в установках з зустрічними пучками для одержання великої світимості в місці зустрічі.

Стан справ. Питання крайового фокусування пучка за допомогою торцевих зрізів дипольних магнітів в лінійному наближенні вивчені досить давно, и таке фокусування застосовується в великій кількості діючих установок. В ряді прецизійних пристроїв, таких як магнітні спектрометри, враховують вплив крайових полів на зміну траєкторії часток, визначають компоненти поля високого порядку і розраховують їх вплив на динаміку пучка. При цьому використовуються числові методи розрахунку. Такий метод дає добрі результати, якщо розраховується одноразове проходження пучка через поле складного виду, наприклад - через поле спектрометра, але неприйнятний для розрахунку циклічних установок.

Відомо чимало робіт, в яких досліджується проходження окремих часток через область крайового поля, але отримати з них узагальнюючі показники, що характеризують динаміку пучка, досить складно. В ряду робіт вказується на проблеми, що пов'язані з крайовими полями при малому радіусі кривини дипольних магнітів і на те, що питання урахування цих полів викликають найбільші дискусії. Також відомо, що вставки - плоскі виглери та ондулятори - помітно впливають на частоту вертикальних бетатронних коливань.

Метою дисертаційної роботи є дослідження впливу крайових полів магнітних елементів на динаміку пучка в циклічних прискорювачах і нагромаджувачах, одержання виразів, що описують крайові ефекти, серед них - для обчислювальних програм розрахунку динаміки пучка, а також одержання практичних рекомендацій що до врахування впливу крайових полів на динаміку пучка під час розрахунків прискорювачів та способам їх зменшення, якщо вони неприємно впливають на пучок.

Наукова новизна роботи полягає у тому, що:

- Виконано теоретичне дослідження впливу крайових полів дипольних магнітів та багатополосних лінз на динаміку пучка. Показано, що крайові поля дипольних магнітів окрім відомого дефокусування пучка в вертикальному напрямку приводять до впливу частоти вертикальних бетатронних коливань від їх амплітуди. Тобто робоча точка на діаграмі бетатронних коливань перетворюється в вертикальну лінію. В цьому разі частки пучка можуть опинитися в різних умовах з точки зору їх усталеності, що може приводити до зростання ефективного емітансу, зменшення динамічної апертури прискорювача і, як наслідок, до зменшення часу життя пучка. Показано, що крайові поля дипольних магнітів та багатополосних лінз створюють додаткові резонансні умови, що також погано впливає на якість пучка. Одержано вирази для урахування цих ефектів в наближенні тонких лінз в обчислювальних програмах, що моделюють динаміку пучка.

- Розроблено методику і проведено експериментальне дослідження нелінійності поперечного руху пучка на нагромаджувачі Н-100 ХФТІ. Показано, що різниця в нелінійності вертикального і горизонтального

руху є наслідком впливу крайових полів дипольних магнітів. Експериментально одержано залежність частоти вертикальних коливань від амплітуди, що добре погоджується з результатами теоретичного дослідження.

- Експериментально та шляхом моделювання на обчислювальній машині процесу повільного резонансного виводу, що був здійснений на нагромаджувачі Н-100 ХФТІ на резонансі третього порядку у вертикальному напрямку, було досліджено вплив крайових полів на процес повільного виводу. Показано, що з збільшенням амплітуди коливань зростає відстань від резонансу і, як наслідок, зменшується прибуток амплітуди пучка на кожному оберті в процесі виводу.

- Проведено розрахунки впливу крайових полів дипольних магнітів на параметри пучка для кількох установок. Вони показали, що крайові ефекти найбільш помітні в циклічних прискорювачах на малі та середні енергії.

- Плоскі вставки - віглери та ондулятори - розглянуто як суперпозиція крайових полів і визначено залежність зсуву частоти від амплітуди. Проведено розрахунок динамічної апертури джерела синхротронного випромінювання ДСВ-800, що розробляється в ХФТІ, з врахуванням крайових полів дипольних магнітів. Показано, що вони помітно впливають на неї.

Практична цінність. Результати роботи було безпосередньо використано під час розробки методики та проведенні експериментів по повільному виводу електронів з нагромаджувача Н-100. З врахуванням крайових полів розрахункова ефективність виводу добре збіглась з експериментальною. Ці дослідження було використано під час спорудження каналу квазібезперервного пучка електронів з енергією 70-100МеВ для експериментів на внутрішніх мішенях. Результати роботи також було використано під час розрахунків дипольного магніту та динамічної апертури спеціалізованого джерела синхротронного випромінювання ДСВ-800.

Основні положення, що подаються до захисту:

1. Методами гамільтонової механіки проведено теоретичне дослідження впливу крайових полів дипольних магнітів та багатополюсних лінз на динаміку пучка в циклічних прискорювачах та нагромаджувачах. Визначено типи резонансів, що збуджуються крайовими полями дипольних магнітів, квадрупольних та секступольних лінз. Одержано вирази для опису крайових ефектів дипольних магнітів та квадрупольних лінз в наближенні тонких лінз для їх використання в обчислювальних програмах, що моделюють динаміку пучка. Показано, що крайові поля дипольних магнітів обумовлюють залежність частоти вертикальних бетатронних коливань від їх амплітуди за наслідок кубічної нелінійності магнітного поля на краях магнітів, що має місце в супровідній системі координат. Кубічна нелінійність крайового магнітного поля зменшується при збільшенні довжини крайового поля, а її вплив на пучок зменшується з зменшенням амплітудної функції на краях магнітів.

2. Розроблено методіку та проведено експериментальні дослідження залежності частоти бетатронних коливань від їх амплітуди на нагромаджувачі Н-100. Експериментально вимірювана нелінійність руху у вертикальному напрямку обумовлена крайовими полями дипольних магнітів. Порівняння результатів експериментального та теоретичного дослідження залежності частоти вертикальних бетатронних коливань від їх амплітуди показало їх гарну згоду.

3. Експериментально досліджено ефективність процесу повільного резонансного виводу з нагромаджувача електронів Н-100 у вертикальному напрямку. Вимірювана ефективність виводу гарно узгоджується з результатами розрахунків, що враховують вплив крайових полів дипольних магнітів на рух часток, що виводяться, у вертикальній площі. Під час повільного виводу у вертикальному напрямку з зростанням амплітуди часток, що виводяться, збільшується їх збіг від резонансу і зменшується прибуток амплітуди часток в процесі виводу за наслідок впливу крайових полів дипольних магнітів, тому повільний вивод часток для його більшої ефективності необхідно здійснювати у горизонтальному напрямку.

4. Проведено розрахунки впливу крайових полів дипольних магнітів для магнітних структур ряду прискорювальних встанов. Показано, що лінійний зсув вертикальних бетатронних коливань добре узгоджується з експериментальними даними та з рекомендаціями що до врахування впливу крайових полів на лінійне дефокусування пучка по вертикалі в обчислювальних програмах. Показано, що лінійні та нелінійні ефекти крайового поля тим більші чим менше радіус кривини орбіти у дипольних магнітах.

5. Розроблено метод урахування крайових полів плоских уставок - віглерів та ондуляторів - на динаміку пучка під час провадження аналітичних розрахунків та моделюванні на обчислювальній машині. Проведено розрахунки динамічної апертури розробляемого джерела синхротронного випромінювання ДСВ-800 з урахуванням крайових полів дипольних магнітів та уставок. Показано, що крайові ефекти зменшують динамічну апертуру у вертикальному напрямку.

Агробація роботи та публікації. Основні результати роботи доповідались на: IX Всесоюзній нараді по прискорювачах (м.Дубна, 1984р.), II Європейській конференції по прискорювачах (м.Ніца, 1990р.), XII Всесоюзній нараді по прискорювачах (м.Москва, 1990р.), III Європейській конференції по прискорювачах (м.Берлін, 1992р.), Міжнародній конференції PAC-95 (м.Далас, 1995р.), Міжнародній школі по прискорювачах (м.Егер, Угорщина, 1995р.), наукових семінарах ХФТІ.

Основні результати роботи були надруковані в "Журнале технической физики", "Письмах в журнал технической физики", "Украинском физическом журнале", ВАНТе, препринтах, наукових працях перелічених конференцій та нарад, звітах ХФТІ. Усього по темі дисертації надруковано 12 работ і отримано одне авторське свідчення.

Структура дисертації. Дисертація складається із вступу, трьох розділів, висновку та додатків. Повний обсяг роботи складає 119 сторінок, включаючи 25 малюнків та 3 таблиці. Бібліографія вклучас 90 найменувань. Кожний розділ починається власним вступом та закінчується висновками.

Зміст дисертації

В дисертації систематизовано результати теоретичного та експериментального дослідження впливу крайових полів магнітних елементів на динаміку пучка в циклічних прискорювачах і нагромаджувачах заряджених часток.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дослідження, проаналізовано сучасний стан справ, сформульовано ціль роботи та основні положення, що подаються до захисту.

У першому розділі наведено результати теоретичного дослідження впливу крайових полів магнітних елементів прискорювачів на динаміку пучка з використанням методів гамільтонової механіки.

На початку розділу проведено порівняння різних методів дослідження, що використовуються в фізиці прискорювачів та обґрунтування метода дослідження, що був використаний в даній роботі. Обговорюються результати, що були отримані іншими авторами, з яких видно, що в цей час рух часток в крайових полях в основному досліджується з використанням числових методів, що сприйнятно, якщо розглядати невелику кількість елементів, але їх погано використовувати, коли розглядається динаміка пучка в циклічних установках, де частки багато разів проходять через саме ці елементи.

Повний гамільтоніан подано як складаючогося з двох частин $H=H_0+H_1$, де H_0 - незбурений гамільтоніан, H_1 - збурення гамільтоніану, яке обумовлено дією крайових полів:

$$H_1 = -\frac{R^2 A_\vartheta}{c|B\rho|} - \frac{R}{c|B\rho|} (p_x A_x + p_z A_z), \quad (1)$$

де R - приведений радіус орбіти;

$B\rho$ - магнітна жорсткість частки;

$A_{x,z,\vartheta}$ - компоненти векторного магнітного потенціалу збурення;

$p_{x,z}$ - поперечні імпульси;

c - швидкість світла.

Записано компоненти магнітного векторного потенціалу для дипольних магнітів і багатополосних магнітних лінз. Показано, що завдяки скривлення траєкторії пучка в області крайового поля дипольного магніта (мал.1) в супровідній пучку системі координат, в якій досліджується рух, це поле відображається з використанням двох компонентів потенціалу:

$$\begin{cases} A_x' = B_0 \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^{k+1}}{(2k)! R^{2k-1}} b_0^{(2k-1)}(\vartheta) z^{2k}; \\ A_{\vartheta}' = B_0 \alpha(\vartheta) \sum_k \frac{(-1)^k}{(2k)! R^{2k-1}} b_0^{(2k-1)}(\vartheta) z^{2k}, \end{cases} \quad (2)$$

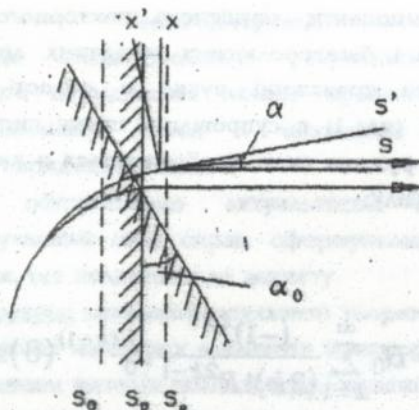
де B_0 - поле в зазорі магніту;

$$b_0^{(2k-1)}(\vartheta) \equiv \frac{\partial^{2k-1} b_0(\vartheta)}{\partial \vartheta^{2k-1}}; \quad (\vartheta = s/R);$$

$$\alpha(\vartheta) = \frac{B_0}{B\rho} \int_{\vartheta}^{2\pi} b_0(\vartheta) d\vartheta + \alpha_0; \quad (\alpha_0 - \text{торцевий кут зрізу магніту}).$$

Також записані компоненти магнітного потенціалу для багатополосних магнітних лінз.

Гамільтоніан збурення складається з двох частин: резонансної, в якій є залежність від азимутального куту, і стабілізуючої, в якій ця залежність відсутня. Показано, що крайові поля можуть збурювати резонанси типу $(2j-1)v_z = p$ та $(2j-1)v_z + v_x = p$ (j, p - цілі числа). Докладно розглянуто резонанс третього порядку. В перемінних дія-фаза отримано формули для стаціонарних точок типу "сідро" і "центр". З стабілізуючої частини гамільтоніану отримано формулу для зсуву частоти вертикальних бетатронних коливань в залежності від амплітуди:



Мал.1. Траєкторія рівноважної частки поблизу вихідного краю магніта. S_0 - розрахунковий початок крайового поля, S_p - механічна межа полюса, S_e - ефективний край поля.

$$\begin{cases} v_x = v_{x0}; \\ v_z = v_{z0} + \frac{R^2 B_0}{B\rho} \sum_{k,j} \frac{(-1)^{k+1}}{[2(k-j)]! j!(j-1)!} I_z^{2(j-1)} Z_0^{2(k-j)} J_{kj}, \end{cases} \quad (3)$$

де v_{x0}, v_{z0} - робоча частота бетатронних коливань установки;

$$J_{kj} = \frac{1}{2\pi R^{2k-1}} \sum_m \left| \frac{\beta_z(\vartheta_m)}{2R} \right|^{j2\pi} \int_0^{2\pi} b_0^{(2k-1)}(\vartheta) \alpha(\vartheta) d\vartheta,$$

$\beta_z(\vartheta_m)$ - значення амплітудної функції вертикального руху на m -м краю магніта;

Z_0 - зміщення орбіти по вертикалі.

Відзначимо, що додавання провадиться по усіх $2M$ краях M магнітів. З виразу (3) бачимо, що дія крайових полів може бути зменшена за допомогою торцевого куту зрізу.

Розглянуто збурення, що вноситься в динаміку пучка крайовими полями багатополосних ліз. Показано, що крайові поля квадрупольних

лінз можуть збудити резонанси типу $2\nu_{x,z} = k$, $2\nu(\pm v_x \pm v_z) = k$, а також ведуть до квадратичної залежності частоти горизонтальних та вертикальних бетатронних коливань від їх амплітуди, що визначається добутком модуля функції Флоке у третьому ступені на її похідну по азимуту на входному та вихідному краях. Крайові поля секступольних лінз можуть збудовувати резонанси типу $(2n+1)v_x = k$, $(2n+1)v_x + 2\nu_{x,z} = k$, $\nu_{x,z} = k$, $\nu_1 v_{x,z} + \nu_2 v_{x,z} = k$. Стабілізуюча частина гамільтоніану збурення для секступольних лінз тотожно дорівнює нулю.

З використанням канонічних рівнянь $\left(\frac{dz}{ds} = \frac{\partial H}{\partial p_z}; \frac{dp_z}{ds} = -\frac{\partial H}{\partial z}\right)$

отримано формулу, що відображає вплив крайових полів дипольного магніту на динаміку пучка в наближенні тонких лінз, який з утриманням членів розкладання поля до третього порядку для монохроматичного пучка у матричному вигляді записується як:

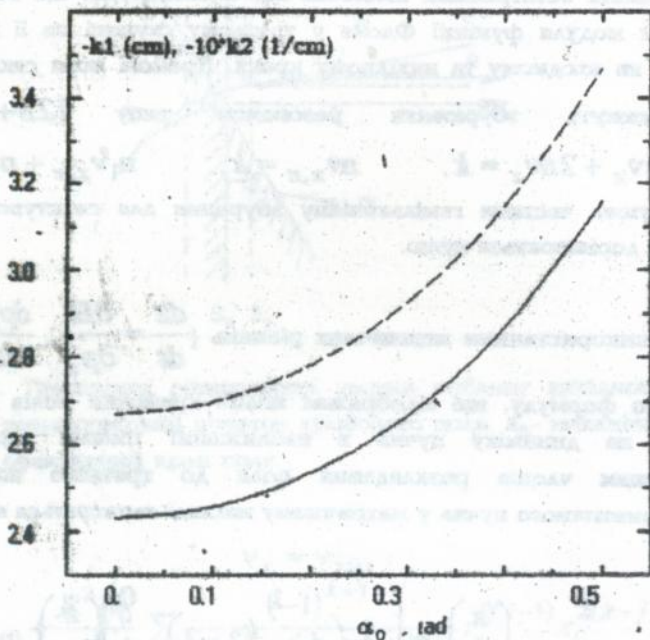
$$\begin{pmatrix} z \\ z' \end{pmatrix}_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{\rho^2} \left(k_1 - \frac{k_2}{6} z^2 \right) & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} z \\ z' \end{pmatrix}_0, \quad (4)$$

$$\text{де } k_1 = \int_0^\infty b_0'(s) \int_s^\infty b_0(s^*) ds^* ds, \quad k_2 = \int_0^\infty b_0^{(3)}(s) \int_s^\infty b_0(s^*) ds^* ds.$$

Порівняння з відомими даними по лінійному зсуву частоти показало їх гарну згоду. В цьому ж уявленні отримано формули для квадруполь. Розраховано коефіцієнти k_1 та k_2 в залежності від кута торцевого зрізу двумірної моделі дипольного магніта (мал.2) і зазору (мал.3).

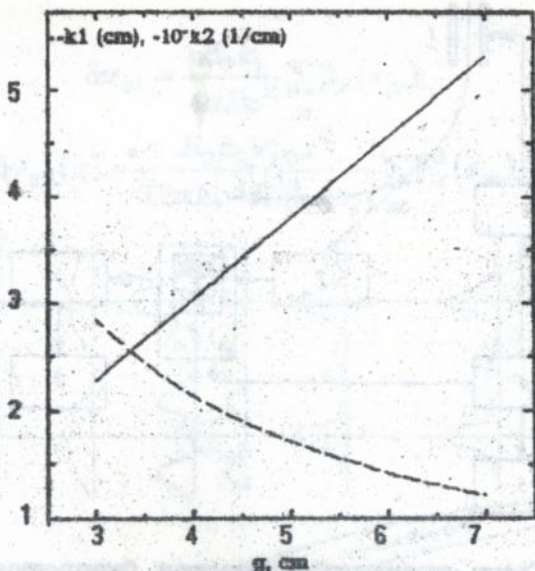
Видно (мал.2), що ці коефіцієнти слабо залежать від кута зрізу. На мал.3 показано, що з збільшенням зазору лінійний зсув частоти зростає, нелінійний - зменшується.

У кінці першого розділу проведено аналіз одержаних в ній результатів.



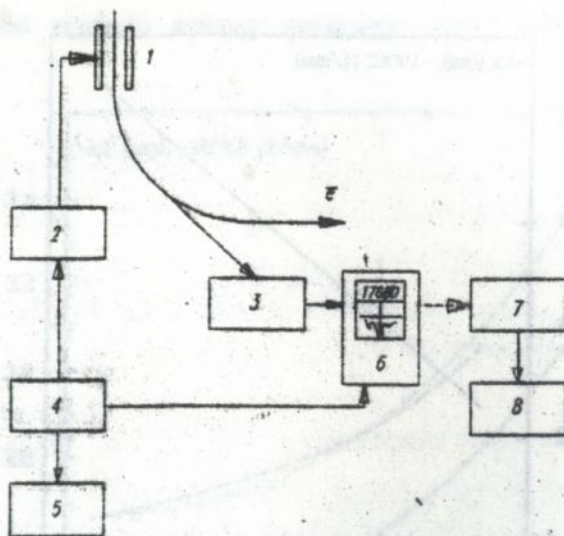
Мал.2. Залежність крайових коефіцієнтів від кута торцевого зрізу дипольного магніту. k_1 - суцільна лінія, k_2 - штрихова.

У другому розділі наведено результати експериментального дослідження впливу крайових полів дипольних магнітів на динаміку пучка. На накопичувачі Н-100 ХФП було вимірювано залежність частоти бетатронних коливань пучка від їх амплітуди. Описана методика експерименту. Резонансне збурення коливань було здійснено високочастотним полем, що утворювалось С-подібним магнітом зферитовим сердечником, що був встановлений в одному з прямокутних проміжків накопичувача. Магніт було повернуто на кут 45° навкруги своєї осі, що давало можливість досліджувати як горизонтальний рух, так і вертикальний. Схема експерименту показана на мал.4.



Мал.3. Залежність крайових коефіцієнтів від зазору в дипольному магніті. k_1 - суцільна лінія, k_2 - штрихова.

Для вимірювання залежності амплітуди коливань від їх частоти було розроблено прилад, що забезпечував плавну зміну частоти збуджуючого поля (світ-генератор) як в бік її збільшення, так і в бік зменшення на відміну від стандартного вимірювача амплітудно-частотних характеристик X1-27, що дає змогу вимірювати тільки одну гілку резонансної кривої. Частота світ-генератора зв'язана з характерними частотами установки як $f = f_r \left(1 - |v_{x0, x0} \pm \delta| \right)$, де f_r - частота обертів. Показання частотоміру, що вимірював частоту світ-генератора, та осцилограми поперечного розподілу густини пучка, отримані за допомогою синхротронного випромінювання, оптично суміщалися та записувалися на відеоманітофон. Вимірювання було проведено на пучку електронів з енергією 100MeV і при величині середнього струму у нагромаджувачі ~ 1 мА.



Мал.4. Схема вимірювання амплітуди бетатронних коливань в залежності від їх частоти на нагромаджувачі Н-100. 1- полюси високочастотного С-подібного магніту; 2- підсилювач; 3- дисектор; 4- світл-генератор; 5- частотомір; 6- осцилограф; 7- приймальна телекамера; 8- відеомагнітофон.

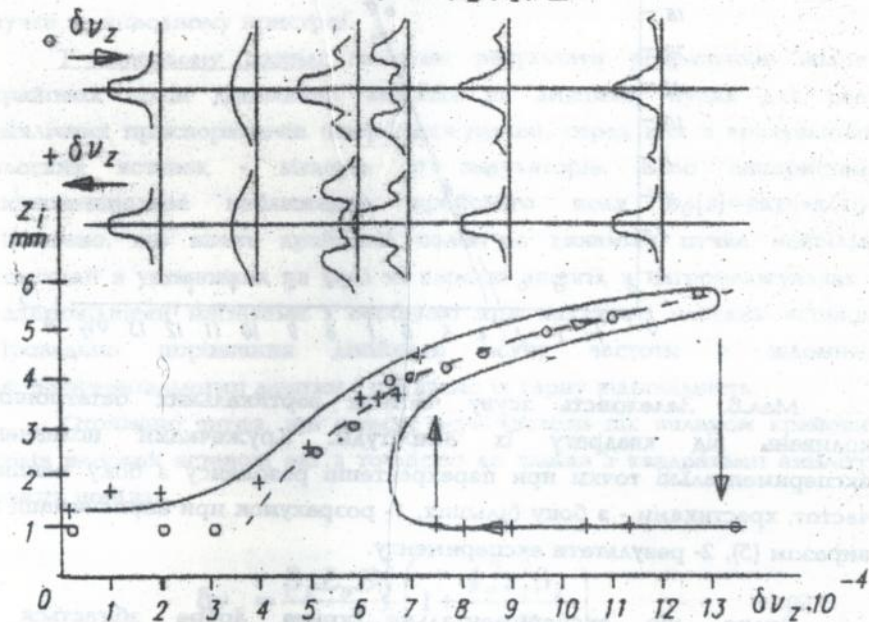
На мал.5 наведено резонансну криву, вимірювану для вертикальних коливань. Штриховою лінією показано усереднену характеристичну криву. Також показано розподіл поперечної густини часток при різних зсувах частоти від резонансу: зверху - коли частота змінюється з боку $\nu_z < \nu_{z0}$, знизу - з боку $\nu_z > \nu_{z0}$.

Коли збурювалися горизонтальні бетатронні коливання, відбувалося швидко (кілька секунд) скидання пучка. Розрахунки, що було проведено за результатах експерименту, показують, що коефіцієнт налітності руху в вертикальному напрямку приблизно на порядок менший, ніж у вертикальному.

Після зведення точки, в якій проводилися виміри (і), до розташування країв магніту (ш) вирізи для лінійного та квадратичного зсуву частоти вертикальних коливань мають вигляд:

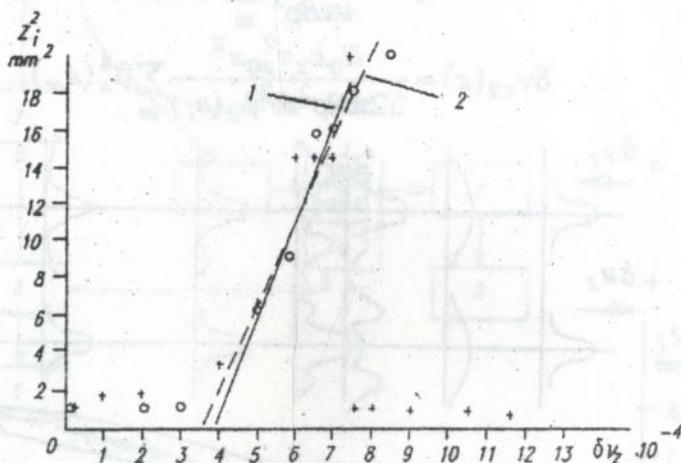
$$\delta v_{z1} = \frac{B_0 k_1}{4\pi B\rho^2} \sum \beta_z(s_m);$$

$$\delta v_{z2}(z) = -\frac{B_0 k_2 v_{z0}^2 z^2}{32\pi B\rho^2 R^2 \beta_z(s_i)} \sum \beta_z^4(s_m). \quad (5)$$



Мал. 5. Резонансні криві вертикальних бетатронних коливань нагрмаджувача Н-100 поблизу резонансу $\nu_z = 2/3$. о, + - експериментальні точки при проходженні резонансу з боку менших та більших частот відповідно. Стрілками показано напрямок проходження резонансу.

На мал.6 наведено експериментальна та розрахункова залежності, частоти вертикальних бетатронних коливань від квадрату їх амплітуди.



Мал.6. Залежність зсуву частоти вертикальних бетатронних коливань від квадрату їх амплітуди. Кружечками позначено експериментальні точки при перехрестенні резонансу з боку менших частот, хрестиками - з боку більших. 1- розрахунок при апроксимації за виразом (5), 2- результати експерименту.

Видно, що експериментальна крива добре збігається з розрахунковою.

Також в цьому розділі наведено результати дослідження впливу крайових полів дипольних магнітів нагромаджувача Н-100 на процес повільного виведення пучка у вертикальному напрямку на резонансі $\nu_z = 2/3$. Особливістю даного експерименту є те, що вивідний пристрій був розташований не в максимумі вертикальної амплітудної функції, що знаходиться на азимуті середини магніту. Моделювання процесу виведення на обчислювальній машині показало, що без врахування крайових полів практично весь пучок губився б на стінках вакуумної камери в максимумі амплітудної функції. Але з врахуванням крайових полів була отримана ефективність повільного виводу, що близька до отриманої експериментально (~40%).

Таким чином, в другому розділі наведено результати експериментального дослідження впливу крайових полів дипольних магнітів на динаміку пучка, що добре узгоджуються з результатами теоретичного дослідження. Основний висновок по цьому розділу полягає в тому, що з-за стабілізуючої дії крайових полів повільний вивід краще здійснювати в горизонтальному напрямку, щоб зменшити втрати пучка на виводному пристрої.

У третьому розділі наведені результати розрахунків впливу крайових полів дипольних магнітів на динаміку пучка для ряду циклічних прискорювачів (нагромаджувачів), серед них з врахуванням плоских вставок - віглерів та ондуляторів. Було використано експоненціальне наближення крайового поля $b_0(s) = \exp(-s/\sigma)$. Показано, що вплив крайових полів на динаміку пучка найбільш помітний в установках на малі та середні енергії, в нагромаджувачах з надпровідними магнітами і особливо при наявності плоских вставок. Проведено порівняння лінійного зсуву частоти з відомими експериментальними даними і показано їх гарну відповідність.

Отримано вираз, що описує зсув частоти під впливом крайових полів плоских вставок, які з точністю до членів з квадратами амплітуд мають вигляд:

$$\delta v_z = \frac{\beta_z L_u B_0^2}{8\pi B^2 \rho^2} \left(1 + \frac{k_u^2 a_z^2 \beta_z}{4R} \right), \quad (6)$$

де L_u - довжина вставки;

$k_u = 2\pi/\lambda$, (λ - період);

a_z - амплітуда коливань.

Відповідна формула для обліку розглянутих ефектів в обчислювальних програмах, що моделюють динаміку пучка, в наближенні тонких ліз має вигляд:

$$\begin{pmatrix} z \\ z' \end{pmatrix}_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{K}{k_u \rho^2} (1 + k_u^2 z^2) & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} z \\ z' \end{pmatrix}_0, \quad (7)$$

Д-р В. В. Стефаніва
АН України

де $K = 1 - \pi/4 - \rho\alpha_0 k_{\text{пр}}$, і в випадку секторних магнітів ($\alpha_0 = 0$) $K = 1 - \pi/4$, прямокутних ($\alpha_0 = 1/k_{\text{пр}}$) $K = -\pi/4$.

Показано, що для фіксованої енергії пучка вплив крайових полів вставки може бути скомпенсовано за допомогою торцевих кутів зрізу на кожному з магнітних блоків: $\alpha_0 = \lambda(4 - \pi)/8\pi\rho$.

З використанням формули (6) проведено розрахунки впливу вставок на динаміку пучка для установок SUPER ACO (Франція), BESSY (Німеччина). Показана добра відповідність результатів розрахунку з наведеними експериментальними даними.

Розглянуто вплив крайових полів дипольних магнітів та віглера на динамічну апертуру джерела синхротронного випромінювання ДСВ-800, що розробляється в ХФПІ. Розрахунки показали, що крайові поля зменшують вертикальну динамічну апертуру установки, хоча в даному випадку вона залишається більше, ніж геометрична.

Таким чином, показано, що крайові поля помітно впливають на динаміку пучка в вертикальному напрямку в установках на малі та середні енергії, особливо в компактних джерелах синхротронного випромінювання з використанням надпровідних елементів як у фокусуємих структурах, так і у вставках.

У висновку сформульовано основні результати, що були отримані в дисертації, а саме:

-Показано, що крайові поля дипольних магнітів обумовлюють з'явлення кубічної нелінійності поля в супровідній системі координат, що викликає залежність частоти вертикальних бетатронних коливань від їх амплітуди. Кубічна нелінійність зменшується, якщо збільшиться довжина крайового поля, а її вплив на пучок зменшується з зменшенням амплітудної функції на кряях магнітів. Визначено типи резонансів, що збуджуються крайовими полями дипольних магнітів, квадрупольних та секстипольних лінз.

-Проведено експериментальні дослідження залежності частоти бетатронних коливань від їх амплітуди на нагромаджувачі Н-100. Експериментально вимірювана нелінійність руху у вертикальному напрямку обумовлена крайовими полями дипольних магнітів.

Порівняння результатів експериментального та теоретичного дослідження залежності частоти вертикальних бетатронних коливань від їх амплітуди показало їх гарну згоду.

Експериментально досліджено ефективність процесу повільного резонансного виводу з нагромаджувача електронів Н-100 у вертикальному напрямку. Вимірювана ефективність виводу гарно узгоджується з результатами розрахунків, що враховують вплив крайових полів дипольних магнітів на рух часток, що виводяться, у вертикальній площі. Обґрунтовано висновок, що повільний вивод часток для його більшої ефективності необхідно здійснювати у горизонтальному напрямку.

Показано, що лінійний зсув вертикальних бетатронних коливань добре узгоджується з експериментальними даними та з рекомендаціями щодо врахування впливу крайових полів на лінійне дефокусування пучка по вертикалі в існуючих обчислювальних програмах.

Розроблено метод урачування крайових полів плоских вставок - віглерів та ондуляторів - на динаміку пучка під час провадження аналітичних розрахунків та моделюванні на обчислювальній машині. Проведено розрахунки динамічної апертури розробляемого джерела синхротронного випромінювання ДСВ-800 з урачуванням крайових полів дипольних магнітів та вставок. Показано, що крайові ефекти зменшують динамічну апертуру у вертикальному напрямку.

У висновку наведено:

1. Вирази для компонент індукції магнітного поля і магнітного потенціалу багатополюсних лінз.
2. Гамільтоніан збуреного руху з точністю до розкладу крайового поля дипольного магніту до третього порядку.
3. Гамільтоніан збурення квадрупольної лінзи до членів розкладу другого порядку включно.

Особиста участь

Самостійно виконано теоретичні розрахунки впливу крайових полів магнітних елементів на динаміку пучка: багатополюсних лінз [1], дипольних магнітів [6,8,10,11], віглерів та ондуляторів [12], розрахунки крайових ефектів дипольного магніту Джерела синхротронного випромінювання ДСВ-800, що розробляється в ХФТІ [7], отримані

формули було використано під час розрахунків динамічної апертури ДСВ-800 [13].

Приймалась безпосередня участь в підготовці та проведенні експериментальних досліджень динаміки пучка на нагромаджувачі Н-100, що були пов'язані з крайовими ефектами під час повільного виводу пучка [2,9], в розробці методики вимірювання залежності частоти бетатронних коливань від їх амплітуди [3-5] та у самих вимірюваннях [6,8].

Основні матеріали дисертаційної роботи оприлюднені у публікаціях:

1. Е.В.Буляк, С.В.Ефимов. "Влияние краевых полей многополюсных магнитных линз на поперечное движение заряженных частиц в циклических ускорителях". ЖТФ, т.51, в.7, 1987, с.1324-1327.

2. Е.В.Буляк, П.И.Гладких, С.В.Ефимов и др.. "Медленный Вывод пучка из накопителя электронов". Письма в ЖТФ, том 10, вып. 23, 1984, с.1421-1423.

3. Е.В.Буляк, С.В.Ефимов, В.В.Марков, Н.И.Мочешников. "Экспериментальное исследование потерь частиц интенсивного электронного пучка в накопителе на одномерном резонансе третьего порядка". УФЖ, т.27, №10, 1982, с.1453-1455.

4. Е.В.Буляк, С.В.Ефимов, В.В.Марков. "Измерение частоты некогерентных синхротронных колебаний". ВАНТ, Сер. Техника физ. эксперимента. Вып.1(10),1982, с. 74-75.

5. Е.В.Буляк, С.В.Ефимов, В.В.Марков. "Способ измерения частоты продольных некогерентных колебаний сгустка заряженных частиц". Авторское свидетельство №890958, Бюллетень "Изобретения, открытия и товарные знаки" №26, 1982г.

6. Е.В.Буляк, С.В.Ефимов, А.С.Тарасенко. "Нелинейные эффекты краевого поля дипольных магнитов в циклических ускорителях и накопителях заряженных частиц". Препринт ХФТИ 87-11, М.,ЦНИИАтоминформ, 1987, 9с.

7. Е.В.Буляк, С.В.Ефимов, И.М.Карнаухов и др.. "Дипольный магнит источника синхротронного излучения ИСИ-800". Препринт UNSC 3, Киев, 1993, 16с.

8. Е.В.Буляк, С.В.Ефимов, А.С.Тарасенко. "Нелинейные эффекты краевого поля поворотных магнитов в циклических ускорителях и накопителях". Труды IX Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц (Дубна, 1984г.), т.2, с.276-279.

9. Е.В.Буляк, П.И.Гладких, С.В.Ефимов и др.. "Эксперименты по медленному выводу электронов из накопителя Н-100". Труды IX Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц (Дубна, 1984г.), т.2, с.250-253.

10. E.V.Bulyak, S.V.Efimov. "Nonlinear effects due to fringe fields of cyclic accelerator dipoles". Proc. EPAC-90, v.2, 1990, p.1455-1457.

11. С.В.Ефимов. "О влиянии краевых полей дипольных магнитов на динамику пучка в циклических ускорителях". Тезисы докладов XIII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц (Москва, 1990г.), с.161.

12. S.V.Efimov. "Fringing Field Effects of the Plane Undulator on Beam Dynamics in Storage Ring". Proc. EPAC-92, 1992, v.1., p.664-666.

13. S.Efimov, I.Karnaukhov, S.Kononenko et al.. "The dynamical aperture of ISI-800". Proc. PAC-95, Dallas, 1995.

Ефимов С.В. "Влияние краевых полей магнитных элементов на динамику пучка в циклических ускорителях и накопителях заряженных частиц" /рукопись/ - на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.20 - физика пучков заряженных частиц. Защита состоится на заседании Специализированного Совета Д 02.19.01 при Харьковском физико-технологическом центре (г.Харьков, ул. Новгородская,1) "4" июня 1996г.

Аннотация. В диссертации теоретически, методами гамильтоновой механики, и экспериментально проведено исследование влияния краевых полей дипольных магнитов и многополюсных магнитных линз на динамику пучка. Определены типы возбуждаемых резонансов. Показано, что краевые поля дипольных магнитов приводят к зависимости частоты вертикальных бетатронных колебаний от их амплитуды. Приведены результаты экспериментального исследования этой зависимости на накопителе электронов Н-100. Экспериментально

исследовано влияние краевых полей на процесс медленного вывода пучка из накопителя N-100 по вертикали. Приведены результаты расчётов краевых эффектов для ряда магнитных структур. Показано, что краевые поля дипольных магнитов и вставок уменьшают динамическую апертуру накопителей.

Ключевые слова: накопитель, магнит, краевое поле, резонанс, динамическая апертура, медленный вывод.

S.V.Efimov, "Fringing field effects of magnetic elements on beam dynamics at cyclic accelerators and storage rings".

Abstract. Fringing field effects of dipole magnets and multipole lenses on beam dynamics are investigated in the thesis both by theory (with the use of Hamilton mechanics methods) and experimentally. Types of perturbed resonances are determined. It is shown that dipole fringing fields lead to dependence of vertical betatron tune on the oscillation amplitude. Results of experimental research into this dependence for the Electron Storage ring N-100 are presented. Fringing field effects on the vertical slow beam extraction from N-100 are investigated experimentally. Calculations of fringing field effects for a number of magnetic structures are given. It is shown that the fringing fields of dipoles and the insertion devices reduce the of storage ring dynamic aperture.

Key words: storage ring, magnet, fringing field, resonance, dynamic aperture, slow extraction.

Підписано до друку 17.05.96. Формат 60x84/16. Офсетний друк.
Умовних друкованих аркушів 1,0. Тираж 100. Замовлення №49.

Харків-108, ротاپронт ННЦ ХФТІ

436880

AB 35.189