

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

На правах рукопису

Щербаков Олександр Олександрович

УДК 621.384.6

ДЖЕРЕЛО СИНХРОТРОННОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ
ДСВ - 800.
РОЗРАХУНОК ТА ВИБІР ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ.

01.04.20 - фізика пучків заряджених часток

Автореферат дисертації
на здобуття вченого ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Харків - 1996

АВ34.222

ЛННБ України ім.В.Стефаніка



00740217 (L)

му науковому центрі Харківський фізико-

технологічний інститут (ННЦ ХФТ)

НАУКОВИЙ КЕРІВНИК:

Карнаухов Іван Михайлович - доктор фізико-математичних наук,
професор, ННЦ ХФТ, м.Харків.

ОФІЦІЙНІ ОПОНЕНТИ:

Бомко Василь Олексійович - доктор фізико-математичних
наук, ННЦ ХФТ, м.Харків.

Муратов Володимир Іванович - кандидат фізико-математичних
наук, професор, Харківський
державний університет, м.Харків.

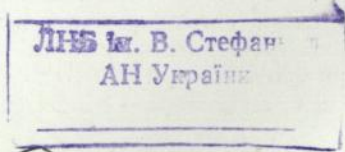
Провідна організація

- Інститут ядерних досліджень
НАН України, м. Київ

Захист дисертації відбудеться "28" 03 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 "21" 02 1996 р.



Вчений секретар
Спеціалізованої Ради
Д 02.19.01

В.П.Демуцький

Загальна характеристика роботи

Актуальність проблеми.

Бурхливе зростання у використанні синхротронного випромінювання, що почалося з середини сімдесятих років, стимулювало розробку нових джерел синхротронного випромінювання (ДСВ). Проекти таких установок постійно розвивалися й удосконалювались і, внаслідок цього, зараз є велика різноманітність "фабрик" синхротронного випромінювання. Відсутність ДСВ в Україні (виключаючи застарілий нагромаджувач електронів Н-100 в м.Харкові) веде до відставання і в розвитку високоєфективних методів досліджень, і в створенні сучасних приладів мікроелектроніки з великим об'ємом пам'яті й високою швидкодією, що приведе до великих труднощів в розробці наукових технологій.

Поширення діапазону застосування синхротронного випромінювання як потужного дослідного та технологічного прилада, викликає підвищені вимоги до якості фотонного пучка й поперед усього до його спектральної яскравості, тому що цей параметр характеризує працездатність, продуктивність та можливість використання ДСВ у прикладних цілях.

Більше 50 прискорювальних лабораторій в світі працюють над проектуванням та створенням нагромаджувачів - джерел синхротронного випромінювання, удосконаленням їх параметрів з метою поліпшення якості фотонних пучків.

Таким чином, розробка фізичного обґрунтування та проекту компактного джерела синхротронного випромінювання, генеруючого інтенсивні пучки фотонів в широкому діапазоні енергій від інфрачервоного до жорсткого рентгенівського, є актуальною задачею.

Метою дисертаційної роботи є розробка фізичного обґрунтування малоємтнісного джерела синхротронного випромінювання для Українського Національного Синхротронного Центру, проектування на його основі головних технологічних систем нагромаджувача електронів з енергією до 1 ГеВ, розрахунки параметрів накопиченого пучка та характеристик пучків фотонів.

Наукова новизна роботи полягає в тому, що:

- вибрано і обґрунтовано основні параметри компактного джерела синхротронного випромінювання на базі нагромаджувача електронів з енергією до 1 ГеВ, з ТВА (Triple Bend Achromat) структурою, що дозволяє одержати горизонтальний еміттанс пучка $\sim 2 \cdot 10^{-8}$ м²рад;

- проведено аналітичні та чисельні розрахунки характеристик пучка у вибраній структурі фокусування: розміри, розбіжності, час життя, енергетичний розподіл часток та ін.;

- для розширення діапазону енергій фотонів запропонована та розрахована комбінована структура нагромаджувача, де середній магніт трьох-магнітної ахроматичної ячейки замінюється надпровідним магнітом з індукцією магнітного поля до 10 Та, показано, що в такій структурі фокусування можна одержати горизонтальний еміттанс пучка $\sim 4 \cdot 10^{-8}$ м²рад;

- розраховано й проведено корегування природної хроматичності нагромаджувача та промодельовано на ЕОМ динамічну апертуру нагромаджувача;

- на підставі розрахунків та результатів комп'ютерного моделювання розроблено основні технологічні системи нагромаджувача (магнітна, вакуумна, височастотна, канал транспортування та система інжекції пучка);

- на нагромаджувачі електронів Н-100 розроблено і впроваджено нові методики вимірювання динамічної апертури, густини залишкового газу на орбіті пучка, вперше експериментально виявлено та теоретично пояснено поздовжній дрейф іонів, захоплених потенціалом електронного пучка. Здобуті експериментальні результати з доброю точністю співпадають з розрахунками, а вдосконалення, впроваджені на нагромаджувачі Н-100 дозволили одержати струм електронів 3 А.

-Практична цінність. Результати роботи були безпосередньо використані при розробці фізичного обґрунтування та проекту компактного малоємітансного джерела синхротронного випромінювання на енергію до 1 ГеВ для Українського Національного Синхротронного Центру.

Основні положення, які подаються до захисту:

1. Обґрунтування та вибір основних параметрів джерела синхротронного випромінювання ДСВ-800 для Українського Національного Синхротронного Центру. Для більшості фундаментальних та прикладних досліджень необхідні інтенсивності фотонних пучків в енергетичному діапазоні від кількох електронвольтів до десятків кілоелектронвольтів можна одержати в нагромаджувачі електронів з енергією пучка до 1 ГеВ та струмом 0.2 А.

2. Обґрунтування та вибір структури фокусування нагромаджувача ДСВ-800. Магнітна структура на основі ТВА (Triple Bend Achromat) - ячейки з градієнтними поворотними магнітами (фокусування пучка у вертикальній площині) дозволяє одержати горизонтальний емітанс пучка $\sim 2 \cdot 10^{-8}$ м рад.

3. Розрахунок та оптимізація системи фокусування на основі комбінованої ТВА-ячейки з надпровідним середнім магнітом з індукцією магнітного поля до 10 Тл для розширення енергетичного діапазону пучків фотонів. У такій структурі можна одержати горизонтальний емітанс пучка $\sim 4 \cdot 10^{-8}$ м рад.

4. Обґрунтування, вибір та розрахунки системи інжекції, каналу транспортування пучка від лінійного прискорювача електронів ЛПЕ-120 до нагромаджувача ДСВ-800 та елементів магнітної системи.

5. Експериментальні результати вимірювання динамічної апертури та ефективної густини залишкового газу на орбіті пучка в нагромаджувачі Н-100, дослідження ефектів, пов'язаних з високою інтенсивністю пучка. Експериментально виявлено та теоретично пояснено поздовжній дрейф іонів, захоплених потенціалом електронного пучка.

Апробація роботи. Здобуті у роботі результати доповідались, дискутувались та знайшли схвалення на міжнародних конференціях з прискорювачів заряджених часток (EPAC-92, Berlin, 24-28 March, 1992; PAC-93, Accelerator Science and Technology, May 17-20, 1993, Washington, 1993).

Particle Accelerator Conference and International Conference on High-Energy Accelerators, 1-5 May 1995, Dallas, Texas, USA), з синхротронного випромінювання (The 3rd International Conference on Synchrotron Radiation Instrumentation, Tsukuba, Japan, 29 August-2 September, 1988; The 4th International Conference on Synchrotron Radiation Instrumentation, Chester, United Kingdom, 15-19 July 1991; та Новосибірськ, липень 1994 р.), з магнітної технології (10th International Conference on Magnet Technology, Boston, USA, 21-25 September 1987; 11th International Conference on Magnet Technology, Tsukuba, Japan, 28 August-1 September 1989), з електронної спектроскопії (5th International Conference on Electron Spectroscopy, July 26 - Aug. 1, 1993, Kiev, Ukraine), на Всесоюзних нарадах з прискорювачів заряджених часток (X Дубна, 21-23 жовтня 1986 р.; XII Москва, 3-5 жовтня 1990 р.), на Міжнародній конференції "Фізика в Україні" (Київ, 22 -27 червня 1993), Всесоюзних семінарах з лінійних прискорювачів, та семінарах ННЦ ХФТІ, Інституту ядерної фізики РАН м.Новосибірськ, НАДЕФА ім. Д.В.Ефремова м.С.-Петербургу, ІМФ НАН України м.Київ.

Публікації. Результати роботи були оприлюднені у журналах "Письма в ЖТФ", "ЖТФ", "ВАНТ", "Nuclear Instruments & Methods in Physics Research", "Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena", "Review of Scientific Instruments", "Journal de Physique" праць перелічених конференцій, збірниках та звітах ННЦ ХФТІ та ІМФ НАН України, по матеріалам дисертації одержано два авторських свідоцтва. Усього по темі дисертації оприлюднено 15 праць.

Структура роботи. Робота складається із вступу, трьох глав, висновку та додатка. Повний обсяг роботи складає 140 сторінок, включаючи 56 рисунків та 20 таблиць. Бібліографія включає 119 найменувань. Кожна глава починається власним вступом та закінчується висновками.

Зміст роботи

У роботі проаналізовано стан справ у світі по спорудженню та використанню джерел синхротронного випромінювання, систематизовано результати розробки фізичного обґрунтування та проекту компактного малоенергійного джерела синхротронного випромінювання ДСВ - 800 на енергію до 1 ГеВ для Українського Національного Синхротронного Центру та результати експериментів на єдиному в Україні нагромаджувачі електронів Н-100, що склали експериментальний досвід при розробці проекту ДСВ - 800.

У вступі обґрунтовано актуальність теми досліджень, проаналізовано сучасний стан справ у світі, сформульовано мету роботи та основні положення, які підлягають до запису, а також приведено короткий зміст роботи.

У першому розділі описано обґрунтування та вибір основних параметрів джерела синхротронного випромінювання ДСВ-800, вибір та оптимізацію структури фокусування нагромаджувача з метою одержання пучків фотонів високої спектральної яскравості в широкому діапазоні енергій, а також результати розрахунків характеристик циркулюючого в нагромаджувачі пучка: світлості, розміри, розбіжності, час життя, енергетичний розкид часток, та результати моделювання динамічної апертури.

Для більшості експериментів, які здійснюються з використанням синхротронного випромінювання, основним параметром є спектральна яскравість, яка суттєво залежить від поперечних розмірів (σ_x, σ_z) та розбіжностей (α_x, α_z) електронного пучка, які в свою чергу, визначаються емітансами пучка (ϵ_x, ϵ_z) та структурними функціями нагромаджувача

$$\sigma_x = \sqrt{\epsilon_x \beta_x + (\eta_x \alpha_x)^2}, \quad \sigma_z = \sqrt{\epsilon_z \beta_z},$$

$$\alpha_x = \sqrt{\epsilon_x \frac{1 + \alpha_x^2}{\beta_x}}, \quad \alpha_z = \sqrt{\epsilon_z \frac{1 + \alpha_z^2}{\beta_z}},$$

де β_x, β_z, η_x - амплітудні та дисперсійні функції нагромаджувача, які визначаються магнітною оптикою кільця,

α_x - енергетичний розкид часток пучка,

$\alpha_z = -\frac{1}{2} \beta_z$ - параметр Твісса,

β_x - похідна амплітудної функції (горизонтальної або вертикальної) по поздовжній координаті s .

В нагромаджувачах електронів горизонтальний емітанс визначається формулою:

$$\epsilon_x = \frac{C_q \cdot \gamma^2}{\rho \cdot J_x} \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \rho} \int_{\text{magnets}} H \cdot ds,$$

$$\text{де } C_q = \frac{59 \square}{32 \sqrt{3} mc} = 3.84 \cdot 10^{-13} \text{ м рад};$$

γ - релятивістський фактор ($\gamma = E/0.511$, E - енергія електронів в MeV);

ρ - радіус кривини в дипольних магнітах, пов'язаний з енергією електронів та індукцією магнітного поля співвідношенням $\rho [\text{м}] = 3.3356 \cdot E [\text{MeV}] / B [\text{Tл}]$;

m_e - маса електрона ($9.10958 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$);

c - швидкість світла у вакуумі ($2.9979 \cdot 10^8 \text{ м/с}$);

$$H = \gamma_x \eta_x^2 + 2 \alpha_x \eta_x \eta_x' + \beta_x \eta_x'^2;$$

η_x - похідна дисперсійної функції по поздовжній координаті s ;

$$\gamma_x = \frac{1 + \alpha_x^2}{\beta_x} - \text{функція Твісса};$$

J_x - коефіцієнт загасення бетатронних коливань.

Таким чином, для одержання малого емітансу пучка в нагромаджувачі треба оптимізувати структурні функції в дипольних магнітах.

Таблиця 1.

Елемент	Довжина, м	Сила
DO(1/2)	1.6162	
Q1	0.2	4.4765 м ⁻²
D1	0.15	
Q2	0.2	-2.6920 м ⁻²
D2	0.7	
RB	1.05	30°, -0.7453 м ⁻²
D3	0.6	
Q3	0.2	7.520 м ⁻²
D4	0.6	
RB(1/2)	0.525	15°, -0.7453 м ⁻²

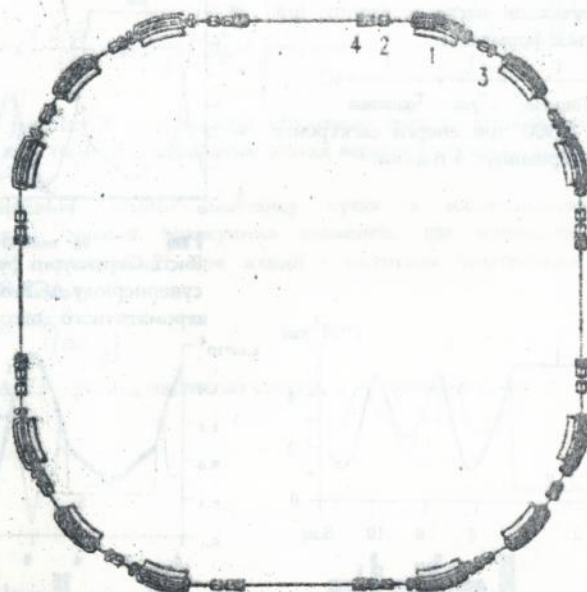


Рис. 1 Схема нагрмаджувача ДСВ-800.

- 1 - поворотні магніти, 2 - фокусуєчі та дефокусуєчі в горизонтальній площині квадрупольні лінзи, 3 - секступольні магніти, 4 - двокоординатні корегуєчі магніти.

Після порівняльного аналізу можливих типів структур фокусування нагрмаджувача для ДСВ - 800 обрано, так звану ТВА (Triple Bend Achromat) -

структуру, яка дозволяє одержати мінімальний емітанс, та забезпечує гнучкість структури, малу чутливість до помилок виготовлення та істотування обладнання, просту коректування природної хроматичності та достатню велику динамічну апертуру, в наслідок цього і великий час життя пучка. Магнітну схему чотирьох суперперіодів нагромаджувача ДСВ - 800 показано на рисунку 1, а в таблиці 1 приведено параметри магнітних елементів для половини одного суперперіоду (тут сила квадрупольної лінзи $\epsilon k = \frac{1}{B \cdot \rho} \frac{dB_z}{dx}$, де B - індукція магнітного поля у дипольному магніті, D - дрейфовий проміжок, Q - квадрупольна лінза, RB - поворотний магніт).

Структурні функції фокусування одного суперперіоду ДСВ - 800, які розраховано за допомогою програми DeCA, показано на рисунку 2.

В цій структурі проведено розрахунки розмірів та розбіжностей пучка в горизонтальній та вертикальній площинах (рисунки 3 та 4), та часу життя, зумованого елементарними процесами: пружне та непружне розсіяння на ядрах та електронах, а також час життя через ефект Тушека. Повний час життя пучка в нагромаджувачі, що визначається формулою

$$\frac{1}{\tau_{total}} = \frac{1}{\tau_{Touschec}} + \frac{1}{\tau_{gas}} + \frac{1}{\tau_{quantum}}$$

для ДСВ - 800 при енергії електронів 800 MeV перевищує 4 години.

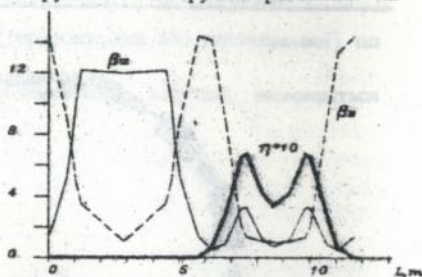


Рис.2 Структурні функції одного суперперіоду ДСВ-800 в режимі ахроматичного довгого проміжка.

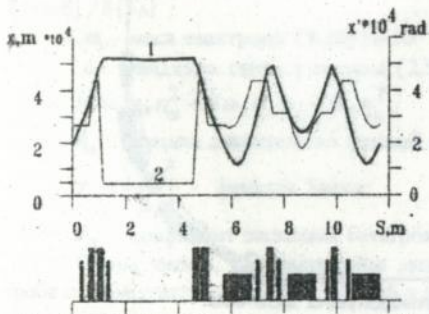


Рис.3. Розмір (1) та розбіжність (2) пучка в горизонтальній площині в режимі з нульовою дисперсією в довгих проміжках

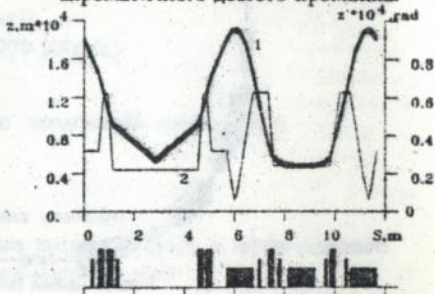


Рис.4. Розмір (1) та розбіжність (2) пучка в вертикальній площині в режимі з нульовою дисперсією в довгих проміжках

Для підвищення діапазону енергії фотонів, які випромінюються із дипольних магнітів, запропоновано комбіновану структуру, де середній магніт ТВА-ячейки змінюється надпровідним магнітом з індукцією магнітного поля в 7 разів вище за індукцію крайніх магнітів (рис. 5).

Еміттанс пучка в такій структурі є

$$\epsilon_{\text{крит}} = \frac{55}{32\sqrt{3}} \frac{h}{2\pi m_e c} \frac{\gamma^2}{J_x} \frac{\frac{l_c}{\rho_c} + \frac{2l_k}{\rho_k}}{\frac{\psi_c}{\rho_c} + \frac{2\psi_k}{\rho_k}}$$

де b - стала Планку,

$$l_c \text{ та } l_k - \int_0^{L_j} \frac{1}{R} ds,$$

ρ_c та ρ_k - радіуси, ψ_c та ψ_k - кути повороту пучка для середнього та крайніх магнітів.

Для нагромаджувача ДСВ-800 знайдено, що для одержання мінімального еміттанса, необхідно забезпечити в центрі середнього магніта

$$\eta_0^* = \rho - \frac{2 \cdot \rho^2}{L} \cdot \sin \frac{L}{2 \cdot \rho}; \quad \beta_0^* = \sqrt{\frac{3 \cdot L \cdot \rho^2 - \rho^3 \cdot \left(8 \cdot \sin \frac{L}{2 \cdot \rho} + \sin \frac{L}{\rho} \right) - 2 \cdot L \cdot \eta_0^{*2}}{L - \rho \cdot \sin \frac{L}{\rho}}}$$

На рисунку 6 представлено структури функції комбінованої структури ДСВ-800, а в таблиці 2 параметри різних варіантів структур фокусування ДСВ-800.

Одержання малого еміттансу пучка в нагромаджувачі потребує використання сильних фокусуєчих елементів, що приводить до великої природної хроматичності, пов'язаної з частотами бетатронних коливань ν_i співвідношеннями:

$$\xi_{i0} = \frac{\Delta \nu_i}{(\Delta E/E)},$$

де $\Delta E/E$ - розкид часток по енергії, а i позначає x чи z .



Рис. 5. Схема суперперіода ДСВ-800 (А - традиційна структура, В - комбінована структура)

Таблиця 2.

Параметр	ТВА	Комбінован а ТВА	Малий емітанс
Енергія номінальна, МеВ	800	800	800
Накопичений ток, мА	200	200	200
Периметр, м	46.729	46.815	46.815
Кількість дипольних магнітів	12	8+4	8+4
Радіус кривини магнітів, м	2.005	2.005/0.267	2.005/0.267
Довжина магніта, м	1.05	1.05/0.14	1.05/0.14
Бета-тронні числа v_x/v_z	4.26/3.20	4.26/3.20	4.26/3.20
Коефіцієнт пакування орбіт α	0.025	0.023	0.021
Природна хроматичність ξ_x/ξ_z	-7.27/-7.24	-6.2/-6.7	-6.2/-6.7
Час загасання коливань $\tau_x/\tau_z/\tau_s$, мс	8.7/13.8/9.8	7.2/7.9/4.1	8.4/9.9/5.4
Емітанс, мрад	$2.7 \cdot 10^{-8}$	$6 \cdot 10^{-7}$	$4 \cdot 10^{-8}$
Розміри пучка в центрі надпровідного магніта σ_x/σ_z , мм		0.54/0.25	0.15/0.07
Енергетичний розкид, %	0.058	0.122	0.125
Втрати енергії за оберт, кеВ	18.3	57.4	57.4
Критич. енергія фотонів із надпр.маг., кеВ		4.2	4.2

Природна хроматичність нагромаджувача ДСВ - 800 складає $\xi_{x0} = -7.6$ та $\xi_{z0} = -6.9$ для нормальної структури і $\xi_{x0} = -6.2$ та $\xi_{z0} = -6.6$ для комбінованої структури.

Для корегування природної хроматичності у магнітну структуру встановлюються секступольні лінзи, що розміщуються в проміжках, де $\eta_x \neq 0$.

Результативна хроматичність повинна бути нульовою (або малою позитивною):

$$\xi_x = \xi_{x0} + \frac{1}{4 \cdot \pi} \sum_{iF, iD} (\lambda_{iF} \cdot \eta_x \cdot \beta_x \cdot l_{iF} - \lambda_{iD} \cdot \eta_x \cdot \beta_x \cdot l_{iD})$$

$$\xi_z = \xi_{z0} + \frac{1}{4 \cdot \pi} \sum_{iF, iD} (\lambda_{iD} \cdot \eta_x \cdot \beta_x \cdot l_{iD} - \lambda_{iF} \cdot \eta_x \cdot \beta_x \cdot l_{iF})$$

$$\text{де } \lambda_{iF}, \lambda_{iD} - \text{ сила секступольних магнітів } \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} \cdot \frac{1}{B \cdot \rho} \right),$$

β_x, β_z, η_x - величини амплітудних та дисперсійної функцій в місцях розміщення секступольнів,

l_{iF}, l_{iD} - довжини секступольних магнітів.

Сильні секступольні лінзи - нелінійні збурення для руху часток - обмежують динамічну апертуру нагромаджувача.

Для зменшення впливу секступольних лінз, корегуючих природну хроматичність, в структуру встановлюють додаткові секступольні лінзи, що розміщуються в проміжках, де $\eta_x = 0$.

Наявність нелінійних елементів приводить до необхідності моделювання динамічної апертури кілія, тобто чисельного інтегрування рівнянь руху:

$$\frac{d^2x}{ds^2} + K_x(s) \cdot x = S(s) \cdot (x^2 - y^2);$$

$$\frac{d^2z}{ds^2} + K_z(s) \cdot z = -2 \cdot S(s) \cdot x \cdot y$$

де $S(s)$ - сила секступольних елементів.

Результати моделювання динамічної апертури показано на рис.7.

У другому розділі описано основні технологічні системи комплексу джерела синхротронного випромінювання АСВ - 800, до складу яких входять:

- магнітна система;
- система інжекції та канал транспортування пучка від лінійного прискорювача АПБ - 120 до накопичувача;
- вакуумна система;
- високочастотна система;
- канали синхротронного випромінювання.

Основним елементом магнітної системи є поворотний магніт. 12 30-градусних магнітів з плоско-паралельними краями та показником спаду магнітного поля $n = -\frac{\rho}{B} \frac{\partial B}{\partial \rho} = 3$

створюють замкнуту орбіту та фокусують пучок у вертикальній площині. Вибір профіля (рис.8) та розрахунки характеристик магніту здійснено за допомогою програми POISSON. Основні параметри поворотного магніта приведено в таблиці 3.

24 квадрупольні лінзи накопичувача об'єднані в 3 групи по 8 в кожній. Геометрія квадрупольних лінз однакова для всіх лінз. Основні параметри приведено в таблиці 4.

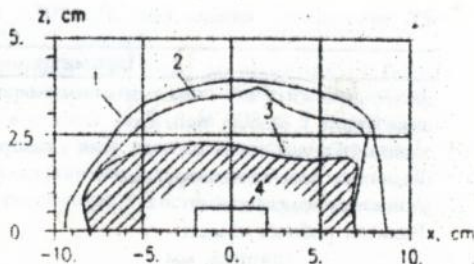


Рис.7. Динамічна апертура накопичувача АСВ-800 в нормальному режимі

- 1 - Динамічна апертура - аналітичний розрахунок;
- 2 - Динамічна апертура - чисельне моделювання (200 частот, 50 обертів) враховуються тільки секступольні поля;
- 3 - Динамічна апертура - чисельне моделювання (200 частот, 50 обертів) з врахуванням мультипольних помилок;
- 4 - Геометрична апертура в середній довгої проміжки.

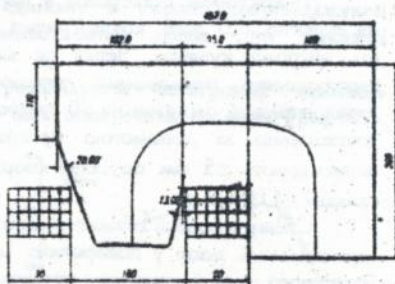


Рис.8 Профіль магнітпроводу поворотного магніту АСВ-800

Таблиця 3.	
Параметр	Значення
Індукція магнітного поля у щілині при номінальній енергії пучка електронів $E = 300$ МеВ, Тл	1.34
Діапазон індукції магнітного поля у зазорі, Тл	0.12-1.65
Величина робочого зазору, мм	36
Довжина полюсів, мм	1050
Розміри робочої області:	
ширина, мм	60
висота, мм	30
Показник спаду магнітного поля	3
Кількість витків у обмотці	48
Діапазон струмів збудження, кА	0.16-1100
Маса магніту, кг	2000

Таблиця 4	
Параметр	Значення
Градієнт індукції магнітного поля, Тл/м	25
Діаметр апертури, мм	50
Довжина полюсів, мм	200
Номінальний струм збудження, А	500
Кількість витків у обмотці	56
Переріз провідника $8 \times 8 - \varnothing 4.5$, мм ²	48
Маса квадрульної лінзи, кг	145

Інжектором електронів в нагромаджувач обрано лінійний прискорювач на енергію 120 МеВ, котрий через вимогу компактності установки розміщено під нагромаджувачем. Через це канал транспортування пучка являє собою вертикальний паралельний перенос з ахроматичним поворотом пучка в горизонтальній площині на 90 градусів. Обвідні пучка в каналі транспортування розраховано за допомогою програми TRANSPORT, розміри пучка не перевищують ± 5 мм по обох координатах. Довжина каналу транспортування складає -11.7 м.

Схему інжекції обрано в горизонтальній площині, що дозволяє зменшити вертикальний зазор у поворотних магнітах, і, таким чином, зменшити об'єм магнітного поля й споживчу потужність установки в цілому. Величина "бейпа" який створюється трьома кикер-магнітами, на азимуті інжекції дорівнює 15 мм, а координата виходу пучка з магнітного септуму 25 мм, що забезпечує амплітуду радіальних бетатронних коливань після інжекції 10 мм.

Вакумна система нагромаджувача ДСВ-800 призначена для одержання тиску $\leq 5 \cdot 10^{-10}$ Торр без пучка та $\leq 5 \cdot 10^{-9}$ Торр з циркулюючим пучком (енергія пучка $E = 0.8$ ГэВ, струм $I = 0.2$ А).

Для ДСВ-800 розраховано швидкість збільшення тиску, пов'язаного з фотодесорбією. Коли струм дорівнює 0.2 А (енергія пучка 1 ГэВ), вона становить -10^{-3} мм рт.ст./с. Для підтримки тиску у всьому класі -10^{-9} мм

рт.ст. треба швидкість відкачування $\sim 10^4$ л/с, що можна забезпечити 25 насосами з швидкістю відкачування 400 л/с кожний.

Для підвищення енергії з інжекційної (120 MeV) до проекційної (1 GeV), компенсації втрат енергії електронним пучком на синхротронне випромінювання та паразитних втрат в стінках вакуумної камери, розроблено високочастотну систему нагромаджувача, яка вклавляє систему збудження, модуль керування ВЧ-сигналом, калістронного підсилювача з системою електроживлення, прискорювального резонатора з системою терморегуляції й системи керування.

Високочастотна система ДСВ-800 буде працювати на частоті 699.3 МГц - на 109 гармонії частоти обертів. Напряга прискорення (200 кВ) створюється одним резонатором оптимізованої форми, працюючим на E_{010} типі коливаний.

Нагромаджувач ДСВ-800 має 24 канали синхротронного випромінювання (3 з них із спеціальних пристроїв - вітлерів та ондуляторів). На рис. 9 показано спектральну яскравість випромінювання, що є основною якісною характеристикою джерела, із дипольного та надпровідного дипольного магнітів.

Яскравість випромінювання, л.д. / (ср.м.м.².ст.р.м.².ст.)

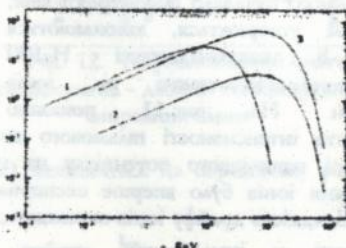


Рис.9. Спектральна яскравість синхротронного випромінювання із дипольного магніта (1) та надпровідного магніта в двох режимах (2 та 3)

У третьому розділі

приведено результати

експериментальних досліджень динамічної апертури, ефективної густини залишкового газу на орбіті пучка на єдиному в Україні нагромаджувачі електронів Н-100, що склали експериментальний досвід при розробці нагромаджувача ДСВ - 800.

За допомогою некогерентного розгойдувача бетатронних коливаний одержано залежність часу життя пучка від його поперечних розмірів (рис. 10).

Видно, що межа області стійкого руху часток складає близько 7 мм. Було застосовано ще одну методику визначення динамічної апертури нагромаджувача Н-100 через вимірювання часу життя пучка при різних положеннях заслінки, що зменшує апертуру вакуумної камери нагромаджувача, та при двох значеннях амплітуди високочастотного поля у резонаторі. Результати вимірів динамічної апертури нагромаджувача Н-100 за допомогою цих двох методів співпали з доброю точністю.

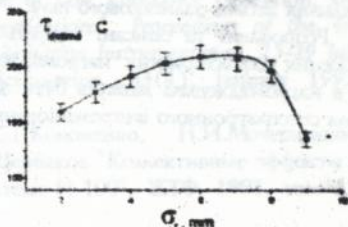


Рис.10. Залежність часу життя пучка від його поперечних розмірів у нагромаджувачі Н-100.

Для вимірювання ефективної густини залишкового газу на орбіті пучка в нагромаджувачі розроблено методику лічби гальмових фотонів, що утворюються при зіткненні циркулюючих електронів з атомами залишкового газу. За такий спосіб можна вимірювати тиск в нагромаджувачі до величин $\sim 10^{-11}$ Торр з доброю точністю.

При великій інтенсивності електронного пучка до потенційної ями, що ним утворюється, захоплюються іони. В нагромаджувачі Н-100 встановлено вичищачі від іонів пластини. На рис.11 показано залежність інтенсивності гальмового випромінювання від струму пучка при подаванні негативного потенціалу на вичищачі пластини у нагромаджувачі Н-100.

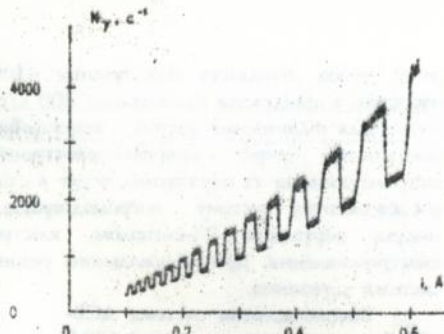


Рис.11. Залежність інтенсивності гальмового випромінювання від струму пучка при подаванні негативного потенціалу на вичищачі пластини у нагромаджувачі Н-100.

залежність інтенсивності гальмового випромінювання від струму пучка при подаванні негативного потенціалу на ці пластини. При дослідженні явища захоплення іонів було вперше експериментально виявлено подовженій дрейф іонів. Швидкість дрейфу іонів виражається формулою

$$v_d = \left(\vec{E}_0 + \omega_c \cdot x_0 \right) \cdot \frac{\omega_x^2}{\omega_c^2 + \omega_x^2},$$

де $\omega_c = \frac{q_i \cdot B_z}{m_i \cdot c}$ - циклотронна частота іонів,

$\omega_x = \sqrt{\frac{q_i I}{2 \pi \epsilon_0 c m_i} \frac{1}{\sigma_x \cdot (\sigma_x + \sigma_z)}}$ - плазмова частота іонів,

x_0 - координата народження іону,

\vec{E}_0 - початкова азимутальна швидкість іону,

q_i, m_i - заряд та маса іону,

B_z - індукція магнітного поля,

c - швидкість світла у вакуумі,

σ_x, σ_z - розміри електронного пучка.

Ця швидкість може набагато перевищувати теплову швидкість нейтральних атомів залишкового газу.

Розроблені та описані в третьому розділі методи експериментального дослідження характеристик нагромаджувача Н-100 та поведінки інтенсивного пучка в нагромаджувачі можуть бути застосовані при запуску та настроюванні джерела синхротронного випромінювання ДСВ - 800.

У висновках обґрунтовано актуальність теми дослідження, сформульовано основні результати, які були отримані у дисертації. Порівнюючи розроблений проєкт джерела синхротронного випромінювання з існуючими аналогічними установками по основному параметру - нормалізованому емітансу пучка в нагромаджувачі

$$\epsilon_n = \frac{\epsilon_{x0} \cdot N^3}{E^2}$$

де ϵ_{x0} - емітанс пучка,
 N - кількість суперперіодів,
 E - енергія пучка,

можна бачити, що DCB-800 (ISI-800) знаходиться на передовому рівні (рис.12).

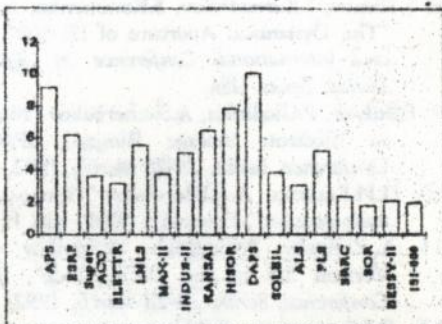


Рис. 12. Нормалізований емітанс нагромаджувачів - джерел синхротронного випромінювання

Основні результати дисертаційної роботи оприлюднені у таких публікаціях:

1. I.Karnaukhov, E.Bulyak, S.Kononenko, A.Shcherbakov, A.Tarasenko, A.Zelinsky "Progress of the ISI-800 Project", 1995 Particle Accelerator Conference and International Conference on High-Energy Accelerators, 1-5 May 1995; Dallas, Texas, USA.
2. A.Shcherbakov, I.Karnaukhov, S.Kononenko, A.Tarasenko "A Combined Magnet Lattice of the Synchrotron Light Source ISI-800", 1995 Particle Accelerator Conference and International Conference on High-Energy Accelerators, 1-5 May 1995; Dallas, Texas, USA.
3. V.F.Boldyshev et.al., "The Kharkov 3 GeV Stretcher Ring as a Source of Synchrotron Radiation", Proceedings of the 3rd International Conference on Synchrotron Radiation Instrumentation, 29 Aug-2 Sept. 1988, Tsukuba, Japan, Rev.Sci.Instrum. 60(7), July 1989, pp.1722-1723.
4. V.F.Boldyshev et.al., "PSR-2000: The Mode of Low Emittance Operation, the Program of Synchrotron Radiation Investigations", Proceedings of the 4th International Conference on Synchrotron Radiation Instrumentation, 15-19 July 1991, Chester, United Kingdom, Rev.Sci.Instrum. 63(1), January 1992, pp.385-387
5. П.И.Гладких, А.Ю.Земинский, С.Г.Конonenko, Н.И.Мочешников, Н.Н.Наугольный, А.В.Репринцев, А.А.Щербаков "Коллективные эффекты в интенсивном пучке электронов накопителем H-100", ЖТФ, 1991, том 61, в.4, с. 118-122.
6. А.Ю.Земинский, Н.И.Мочешников, А.В.Репринцев, А.А.Щербаков "Способ определения динамической вертикальной и радиальной апертуры пучка в накопителе электронов", Авторское свидетельство № 1623540 (1992).
7. А.С.Мазманишвили, А.В.Репринцев, А.А.Щербаков "Способ определения поперечной области устойчивости пучка заряженных частиц", Авторское свидетельство № 852156 (1980)

ЛІНБ ім. В. Стефаніка
 АН України

8. S. Efimov, I. Karnaukhov, S. Kononenko, A. Shcherbakov, A. Tarasenko, A. Zelinsky "The Dynamical Aperture of ISI-800", *1995 Particle Accelerator Conference and International Conference on High-Energy Accelerators*, 1-5 May 1995; Dallas, Texas, USA.
9. E. Bulyak, P. Gladkikh, A. Shcherbakov "Neutralization of the Beam Space Charge in Electron Storage Rings", *EPAC-III, European Particle Accelerator Conference, Berlin, 24-28 March, 1992*, vol.1, pp.810-812.
10. П.И.Гладких, А.А.Щербаков "Продольное движение ионов в электронных накопителях", Письма в ЖТФ, том 11, вып.24, (1985), стр. 1509-1511.
11. A. Zelinsky, P. Gladkikh, M. Strelkov, V. Moskalenko, A. Shcherbakov "New Version 3.3 of the DeCA Code", *EPAC-III, European Particle Accelerator Conference, Berlin, 24-28 March, 1992*, vol.1, pp.685-687.
12. В.Г.Барьяхтар, В.В.Немошкаленко, В.Б.Молодкин, А.А.Щербаков и др. "Магнитная система источника синхротронного излучения ИСИ-800", Препринт UNSC 2, 1993, 14 с.
13. В.Г.Барьяхтар, В.В.Немошкаленко, В.Б.Молодкин, А.А.Щербаков и др. "Дипольный магнит", Препринт UNSC 3, 1993, 19с.
14. И.М.Карнаухов, С.Г.Конюненко, А.А.Щербаков и др. "Комбинированная структура источника синхротронного излучения ИСИ-800", Препринт UNSC 4, 1993, 9 с.
15. V. Nemoshkalenko, V. Molodkin, A. Shpak, A. Shcherbakov, "Synchrotron Radiation Complex ISI-800", *Journal de Physique IV, Colloque C9, supplement au Journal de Physique III, Vol. 4, Novembre 1994*, pp. C9-341 - C9-348.

Підписано до друку 13.02.96. Формат 60x84/16. Офсетний друк.
Умовних друкованих аркушів 1,0. Тираж 100. Замовлення 29.

Харків-310108, ротاپронт НИЦ ХФТІ

444240

AB 34.222