



Диссертационный совет ОИЯИ.02.01.2024.П по физике частиц
при Лаборатории физики высоких энергий им. В. И. Векслера и А. М. Балдина

Шандов Михаил Михайлович

Коррекция ведущего магнитного поля «Бустера» NICA

ДИССЕРТАЦИЯ на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук

Специальность: 1.3.18 Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

Руководитель: д. ф.-м. н. С. А. Костромин

Работа выполнена в Лаборатории физики высоких энергий им. В. И. Векслера и А. М. Балдина
Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна

2024

Проектная светимость коллайдера NICA $10^{27} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ достижима только при условии, что интенсивность инжектируемого пучка достаточна для накопления требуемого числа ионов. Ключевую роль в получении требуемой интенсивности пучка тяжёлых ионов в коллайдере играет новый бустерный синхротрон (Бустер), поскольку основные потери ожидаются на начальном этапе ускорения пучка на энергиях до 5 МэВ/и. Отклонение величины ведущего магнитного поля от проектных значений в синхротронах вызывает возмущения замкнутой орбиты, что приводит к потерям пучка на стенках вакуумной камеры, а также под действием разного рода резонансов. Эти факторы оказывают определяющее влияние на интенсивность циркулирующего и ускоряемого пучка, а получение проектных параметров циркулирующего пучка в Бустере подразумевает коррекцию ведущего магнитного поля установки на этапах настройки, пуско-наладки и дальнейшей эксплуатации.



Цель работы: теоретическое и экспериментальное исследование системы коррекции ведущего магнитного поля Бустера NICA и её использование при настройке устойчивой циркуляции и ускорении пучка с проектной интенсивностью

Задачи:

- 1 Разработана и создана математическая модель магнитооптической структуры Бустера на основе данных измерений магнитных характеристик всех его структурных элементов
- 2 Сделана оценка влияния ошибок магнитного поля Бустера на динамику циркулирующего и ускоряемого пучка
- 3 Проведён расчёт основных магнитных характеристик корректоров ведущего поля Бустера
- 4 Экспериментально исследованы характеристики магнитной структуры Бустера при работе с пучком
- 5 Получена устойчивая циркуляция и ускорение пучка



1 Бустерный синхротрон ускорительного комплекса NICA

Проектные параметры установки
Магнитооптическая структура ускорителя
Технология магнитных измерений

2 Влияние ошибок магнитного поля Бустера на динамику циркулирующего и ускоряемого пучка ионов

3 Система коррекции магнитного поля Бустера

Задачи, проектные и конструктивные особенности системы коррекции
Аналитическое и численное моделирование магнитных полей корректоров
Результаты измерений магнитного поля корректоров
Анализ основных характеристик системы коррекции магнитного поля Бустера

4 Работа системы коррекции

Измерение оптических функций Бустера в линейном приближении. Сравнение полученных экспериментальных результатов с разработанной моделью
Настройка рабочих параметров установки



Бустерный синхротрон ускорительного комплекса NICA

Новый сверхпроводящий бустерный синхротрон (Бустер) является одной из ключевых установок в инжекционной цепочке тяжёлых ионов (вплоть до $^{197}\text{Au}^{31+}$ (проектный вариант) и $^{209}\text{Bi}^{35+}$) в коллайдер и основным инжектором тяжёлых ионов в Нуклотрон

Основные задачи Бустера:

- накопление ионов при энергии инжекции (до $2 \cdot 10^9$ ионов $^{197}\text{Au}^{31+}$)
- ускорение пучка ионов с минимальными потерями на молекулах остаточного газа (уровень вакуума в пучковой камере 10^{-11} торр)
- охлаждение и накопление пучка требуемой интенсивности в заданном фазовом объёме с использованием системы электронного охлаждения
- ускорение пучка тяжёлых ионов до энергии, требуемой для их эффективной «обдирки»
- быстрый вывод ускоренного пучка для его инжекции в Нуклотрон

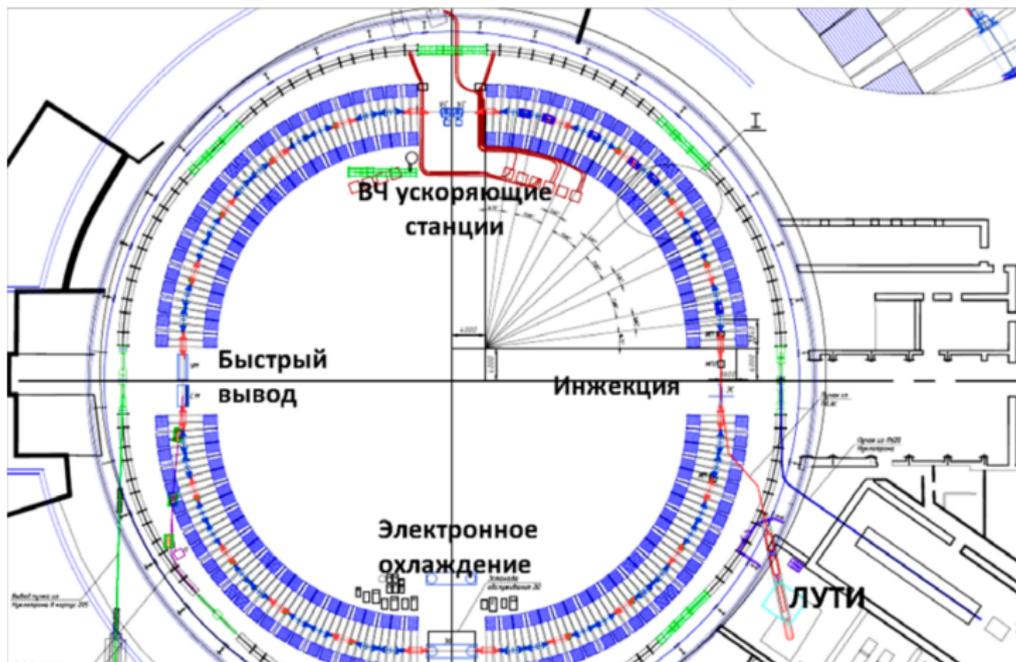


Параметр	Значение
Магнитная жёсткость, Тл · м	1,6–25,2
Частоты бетатронных колебаний, ν_x/ν_y	4,80 / 4,85
Натуральная хроматичность, ξ_x/ξ_y	-5,10 / -5,50
Геометрический акцептанс, π мм · мрад:	
горизонтальный	305* / 150**
вертикальный	80* / 58**
Эмиттанс пучка при инжекции, π мм · мрад	15
Количество ионов в сгустке	$3 \cdot 10^9$
Импульсный разброс, $\Delta p/p$:	
при инжекции	$\pm 10^{-3}$
максимальный	$\pm 2,3 \cdot 10^{-3}$
в конце ускорения	$\pm 5 \cdot 10^{-4}$
Период обращения, мкс	
при инжекции	8,51
в конце ускорения	0,89

$$* - A_{x,y} = \frac{r_{x,y}^2}{\beta_{x,y;max}}$$

$$** - A_x = \frac{(r_x - \eta_{x;max} \frac{\Delta p}{p} \frac{max}{max} - |\Delta(X)CO;max|)^2}{\beta_{x;max}}, \quad A_y = \frac{(r_y - |\Delta(Y)CO;max|)^2}{\beta_{y;max}}$$

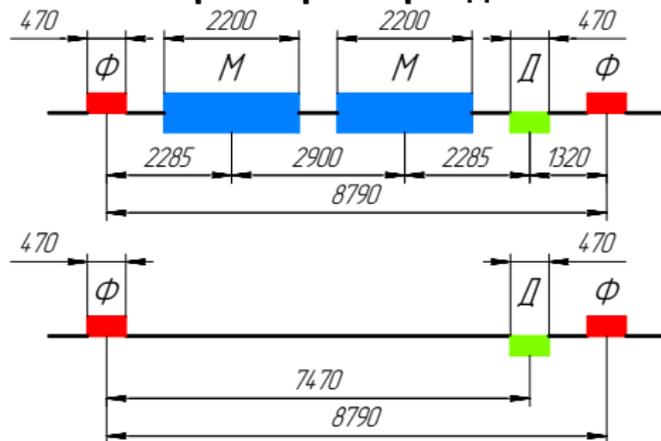




Периметр установки:	210,96 м
Количество суперпериодов:	4
Количество периодов типа ДФО:	24



Параметры периодов



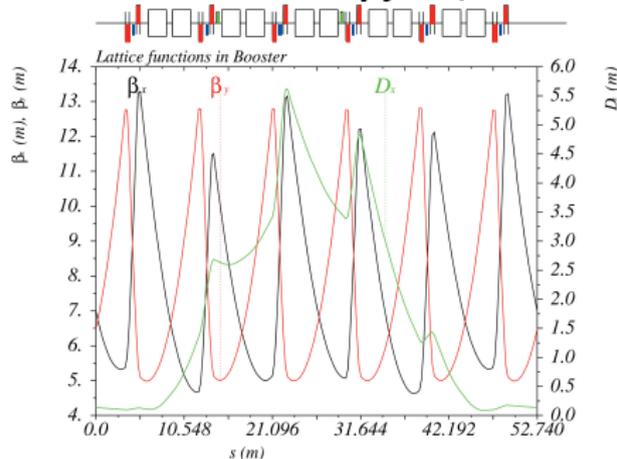
Регулярных периодов: 5

Прямолинейных промежутков: 1

$\beta_{x/y;\max}$, М: 13,4/12,9

$\eta_{x;\max}$, М: 4,4

Оптические функции



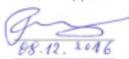
С целью обеспечения проектных параметров установки сформулированы допуски на качество магнитного поля (МП) структурных элементов

«СОГЛАСОВАНО»



26.11.16

«УТВЕРЖДАЮ»



28.12.2016

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ
на серийные магнитные измерения дипольных и квадрупольных магнитов бустерного синхротрона ускорительного комплекса NICA

5. Угол поворота медианной плоскости вокруг продольной оси

$$\alpha = \text{Arctan} \left(-\frac{a_1}{b_1} \right), \alpha_1 \in \left[-\frac{\pi}{2}; +\frac{\pi}{2} \right] \text{ — для дипольного магнита}$$

$$\alpha = \frac{1}{2} \text{Arctan} \left(-\frac{a_1}{b_1} \right), \alpha_1 \in \left[-\frac{\pi}{4}; +\frac{\pi}{4} \right] \text{ — для квадрупольного магнита.}$$

Угол поворота α указывается в протоколе магнитных измерений.

Согласовано:

V.V. Борисов



A.M. Довягин



Составил:

S.A. Костромин

V.A. Михайлов




17.11.2016

Стр 6 из 6

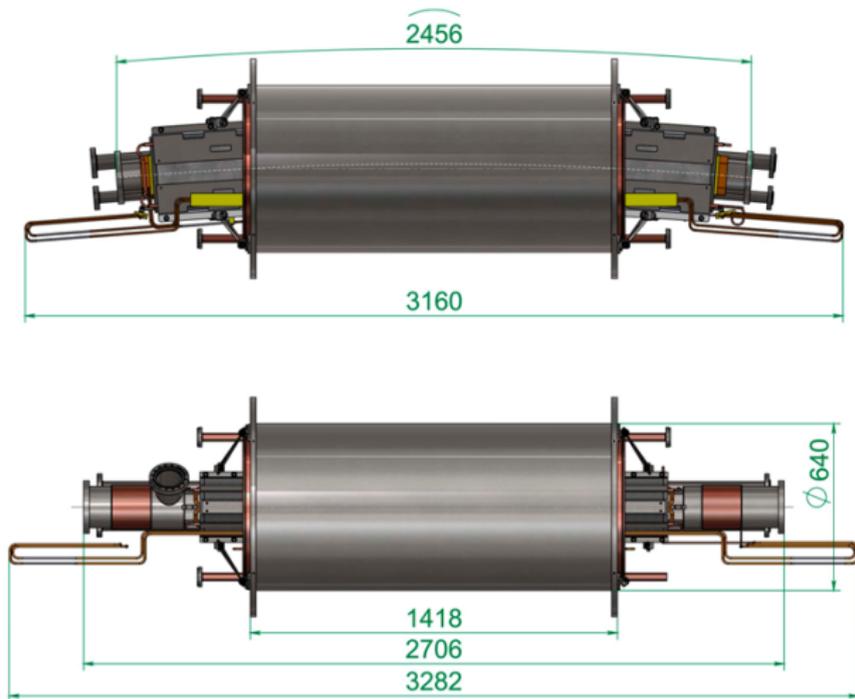
Таблица 1. Допуски на параметры магнитного поля при токе, соответствующем $I_{ref} = 1.8 \text{ Тл}$

Параметр	Дипольные магниты		Квадрупольные магниты	
	Значение	Точность определения	Значение	Точность определения
Относительный разброс эффективных длин	$\pm 5 \cdot 10^{-4}$	10^{-3}	$\pm 5 \cdot 10^{-4}$	10^{-4}
Относительный разброс интегралов (по продольной координате) основной компоненты поля (b_1 — для дип., b_2 — для квадр.)	$\pm 5 \cdot 10^{-4}$	10^{-4}	$\pm 5 \cdot 10^{-4}$	10^{-4}
Угол поворота медианной плоскости вокруг продольной оси элемента	± 0.5 мрад	0.1 мрад	± 1 мрад	0.2 мрад

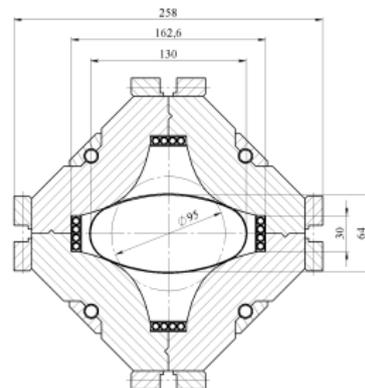
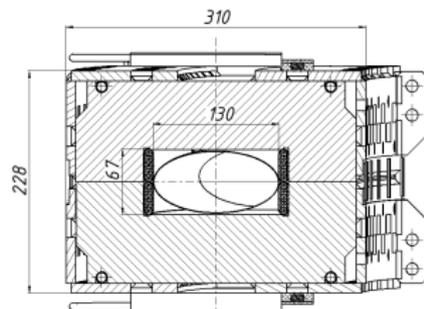
Стр 2 из 6

Перпендикулярное смещение магнитной оси элемента относительно его геометрической оси	-	-	± 0.1 мм	0.02 мм
b_1^*	1	10^{-4}	$3 \cdot 10^{-3}$	10^{-4}
a_1	$5 \cdot 10^{-4}$	10^{-4}	$3 \cdot 10^{-3}$	10^{-4}
b_2	$5 \cdot 10^{-4}$	10^{-4}	1	10^{-4}
a_2	$5 \cdot 10^{-4}$	10^{-4}	10^{-3}	10^{-4}
b_3	$10 \cdot 10^{-4}$	10^{-4}	$10 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$
b_3 при токе инжекции	$1 \cdot 10^{-4}$	10^{-4}	$10 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$
a_3	$5 \cdot 10^{-4}$	10^{-4}	$10 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$
b_4	-	-	$5 \cdot 10^{-4}$	10^{-4}
a_4	-	-	$5 \cdot 10^{-4}$	10^{-4}
b_5	10^{-4}	10^{-4}	-	-
a_5	10^{-4}	10^{-4}	-	-
b_6	-	-	-	10^{-4}
a_6	-	-	-	10^{-4}

Модуль магнита



Поперечное сечение

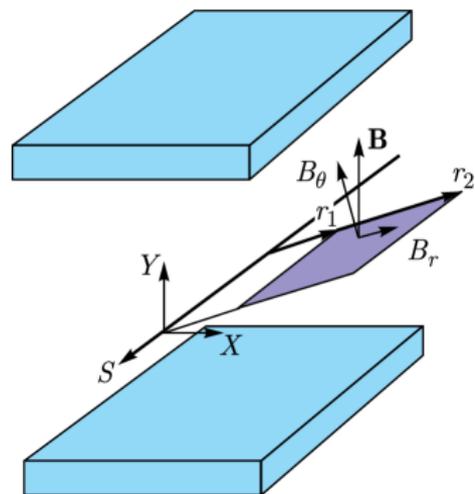


Измеряемые параметры ($R_{\text{ref}} = 30$ мм)

- поле в центре: $B_{1;2} = B_y(s = 0) = B_{\text{ref}} \cdot b_{1;2}$
- интеграл МП: $BL = \int_{-\infty}^{\infty} B_y ds = B_{\text{ref}} L \cdot b_{1;2}$
- эффективная длина: $L_{\text{eff}} = BL/B_{\text{ref}}$
- относительные (нормированные на B_{ref}) величины интегральных «гармоник» МП до 10-го порядка включительно: $b_n^*, a_n^*, n = \overline{1,10}$
- угол наклона медианной плоскости относительно средней плоскости дипольного магнита:

$$\alpha_{\text{ми}} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} B_x ds}{\int_{-\infty}^{\infty} B_y ds} = \frac{a_1^*}{b_1^*}$$

Измерительная рамка



Использована методика гармонических катушек с учётом **требований**

- конструктивных особенностей магнитов:
 - ✓ дипольный магнит **изогнут** с радиусом кривизны 14,09 м (датчик включает **5** прямых катушек, охватывающих, в том числе, и область краевого поля)
 - ✓ дефокусирующий и фокусирующий квадрупольные магниты объединены в **дублет**
- система предназначена для измерений магнитов **всех** типов
- серия необходимых измерений должна выполняться за **один** сеанс охлаждения
- апертура магнитов (128x65 и 129,5x68 мм) делает **невозможным** использование антикриостата для измерительного датчика



Технология магнитных измерений. Результаты [1–3]

Параметр	Дипольный магнит		Квадрупольный магнит	
	Среднее	СКО	Среднее	СКО
Магнитная жёсткость 1,6 Тл · м				
α , мрад	-1,3	1,7	—	0,1
$dX = dY$, мм	—	—	—	0,1
$B_1L (B_2L)$, Тл · мм	—	0,19	—	0,06
$b_3 \cdot 10^4$	-1,0	0,5	-2,0	4,5
$a_3 \cdot 10^4$	—	—	1,5	4,5
$b_4 \cdot 10^4$	—	—	7,5	3,0
$b_6 \cdot 10^4$	—	—	5,0	0,5
Магнитная жёсткость 25,2 Тл · м				
α , мрад	-1,2	1,6	—	0,1
$dX = dY$, мм	—	—	—	0,1
$B_1L (B_2L)$, Тл · мм	—	2,19	—	0,70
$b_3 \cdot 10^4$	8,5	0,5	-2,0	5,0
$a_3 \cdot 10^4$	—	—	1,5	4,0
$b_4 \cdot 10^4$	—	—	7,0	3,0
$b_6 \cdot 10^4$	—	—	4,2	0,8

Отклонение относительной ошибки $B_1L (B_2L)$: $1-2 \cdot 10^{-3}$

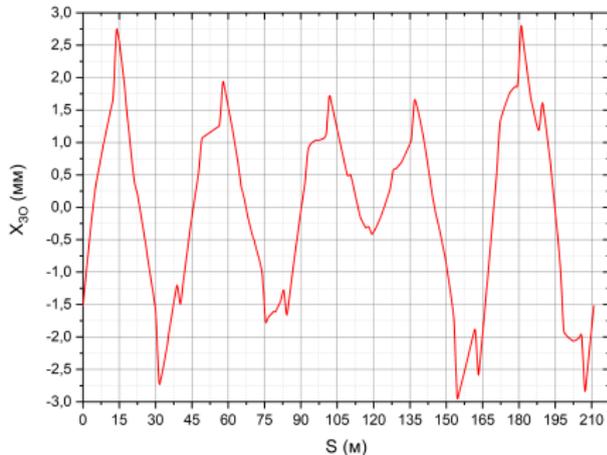
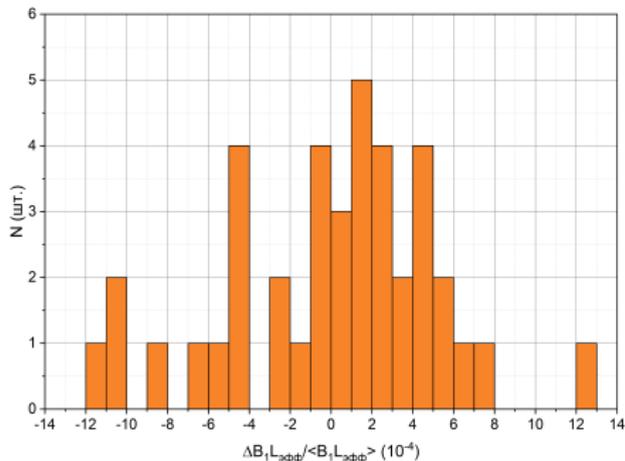


Влияние ошибок магнитного
поля Бустера на динамику
циркулирующего и ускоряемого
пучка ионов

Ошибки дипольных магнитов

$$z(\theta_i) = k_1^b(\theta_0) \sqrt{\beta_z(\theta_i)\beta_z(\theta_0)} \frac{\cos(\pi\nu_z - |\mu_z(\theta_i) - \mu_z(\theta_0)|)}{2 \sin(\pi\nu_z)}, \quad k_n^{(b;a)} = \frac{1}{B\rho} \frac{\partial^{n-1} B_{y;x}}{\partial x^{n-1}}$$

Магнитная жёсткость 25,2 Тл · м



Максимальное возмущение 30:

- при магнитной жёсткости 1,6 Тл · м не превышает ± 2 мм
- при магнитной жёсткости 25,2 Тл · м не превышает ± 3 мм



Смещение бетатронных частот. Связь колебаний

Перейдём от интегрирования к сумме средних значений

$$\Delta\nu_z = \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi R} \Delta k_2^b(s) \beta_z(s) ds \approx \frac{1}{4\pi} \sum_i \langle \Delta k_2^b L_{\text{eff}} \rangle_i \langle \beta_z \rangle_i$$

$$\kappa^{(2)} \approx \frac{1}{4\pi} \sum_i \langle k_2^a L_{\text{eff}} \rangle_i \sqrt{\langle \beta_x \beta_y \rangle_i} e^{i(\bar{\theta}_x - \bar{\theta}_y)}$$

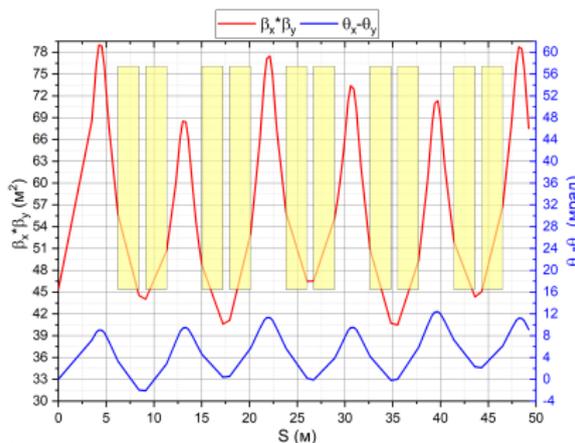
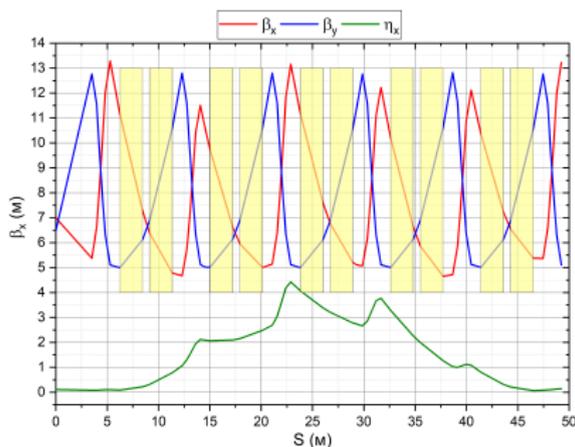
$$\langle b_2 \rangle = 5,5 \cdot 10^{-4} (inj); 4,5 \cdot 10^{-4} (ext) \text{ м}^{-1}$$

$$\langle a_2 \rangle = -7,5 \cdot 10^{-4} (inj); -11,0 \cdot 10^{-4} (ext) \text{ м}^{-1}$$

$$\langle \beta_{x,y} \rangle_1 = 9 \text{ м}, \langle \beta_{x,y} \rangle_2 = 5,5 \text{ м}, \langle \beta_x \beta_y \rangle = 48 \text{ м}^2$$

$$\Delta\nu_z^{inj} \approx 2,0 \cdot 10^{-3}; \Delta\nu_z^{ext} \approx 1,6 \cdot 10^{-3}$$

$$\kappa_{inj}^{(2)} \approx -2,6 \cdot 10^{-3}; \kappa_{ext}^{(2)} \approx -3,8 \cdot 10^{-3}$$

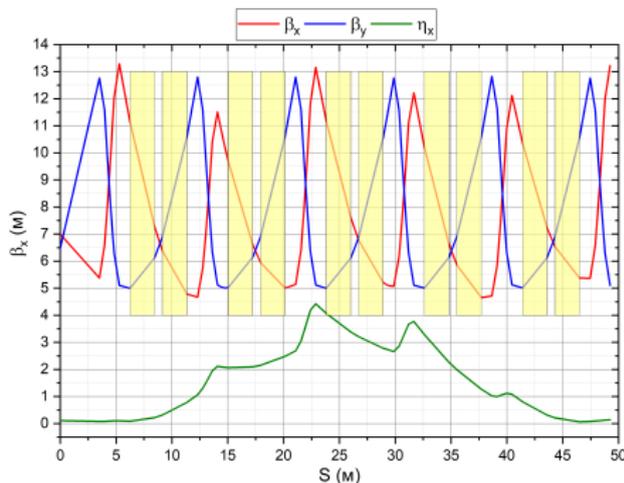


$$\xi_z = \pm \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi R} k_3^b \eta_x(s) \beta_z(s) ds \approx$$

$$\approx \pm \frac{1}{4\pi} \sum_i [\langle k_3^b L_{\text{eff}} \rangle_i \langle \eta_x \rangle_i \langle \beta_z \rangle_i]$$

$$\xi_x^{inj} \approx -0,53 \quad \xi_x^{ext} \approx 5,90$$

$$\xi_y^{inj} \approx 0,46 \quad \xi_y^{ext} \approx -5,68$$



Полученные оценки величин $\xi_{x,y}$ совпадает с результатами расчётов в программных комплексах MAD-X и OptiM с точностью $\pm 2-3\%$, что указывает на правильность сделанных допущений

Результаты первых измерений приводятся далее



Разброс частиц по бетатронным колебаниям

$$\begin{cases} \Delta\nu_x = h_{11110}^{(4)} r_y^2 + 2h_{22000}^{(4)} r_x^2 \\ \Delta\nu_y = h_{11110}^{(4)} r_x^2 + 2h_{00220}^{(4)} r_y^2 \end{cases}$$

$$h_{11110}^{(4)} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi R} \frac{\beta_x \beta_y}{(2R)^2} k_4^b R ds \quad r_{x,y}^2 = \frac{R \varepsilon_{x,y}}{2} \Leftrightarrow \varepsilon_{x,y} = \frac{2r_{x,y}^2}{R}$$

$$h_{22000}^{(4)} = -\frac{1}{8\pi} \int_0^{2\pi R} \left(\frac{\beta_x}{2R}\right)^2 k_4^b R ds \quad h_{00220}^{(4)} = -\frac{1}{8\pi} \int_0^{2\pi R} \left(\frac{\beta_y}{2R}\right)^2 k_4^b R ds$$

$$\begin{cases} \Delta\nu_x \approx \frac{1}{16\pi} \varepsilon_y \sum_i [\langle k_4^b L_{\text{eff}} \rangle_i \langle \beta_x \beta_y \rangle_i] - \frac{1}{64\pi} \varepsilon_x \sum_i [\langle k_4^b L_{\text{eff}} \rangle_i \langle \beta_x^2 \rangle_i] \\ \Delta\nu_y \approx \frac{1}{16\pi} \varepsilon_x \sum_i [\langle k_4^b L_{\text{eff}} \rangle_i \langle \beta_x \beta_y \rangle_i] - \frac{1}{64\pi} \varepsilon_y \sum_i [\langle k_4^b L_{\text{eff}} \rangle_i \langle \beta_y^2 \rangle_i] \end{cases}$$

$$\begin{cases} \Delta\nu_x^{inj} \approx -0,10\varepsilon_x + 3,11\varepsilon_y & \Delta\nu_x^{ext} \approx -0,12\varepsilon_x + 4,43\varepsilon_y \\ \Delta\nu_y^{inj} \approx 3,11\varepsilon_x - 0,07\varepsilon_y & \Delta\nu_y^{ext} \approx 4,43\varepsilon_x - 0,13\varepsilon_y \end{cases}$$

В пределах адмиттанса ускорителя:

$$\Delta\nu_x \approx 7,5 \cdot 10^{-4} \quad \Delta\nu_y \approx 20,6 \cdot 10^{-4}$$

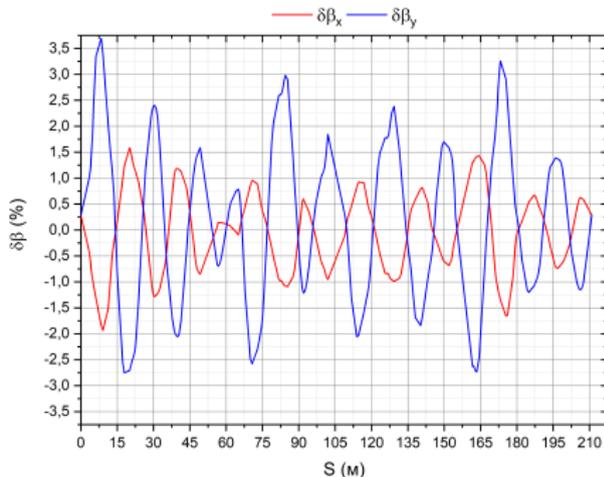
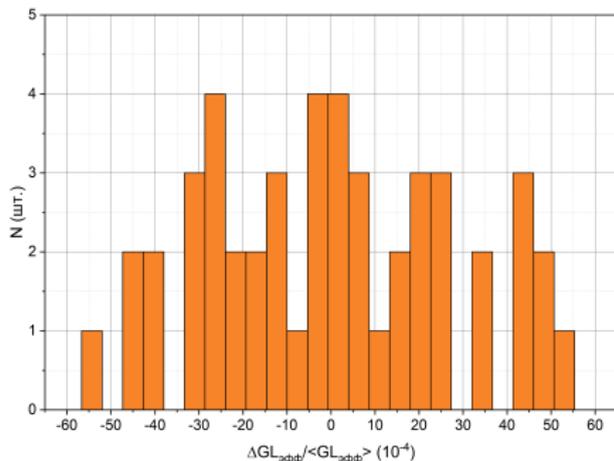


Ошибки квадрупольных магнитов

Возмущение амплитудных функций

$$\delta\beta_z = \frac{\Delta\beta_z}{\beta_{z;0}}(\theta_0) = \pm \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \Delta k_2^b(\theta_i) \beta_z(\theta_i) \frac{\cos[2(\pi\nu_{z;0} + \mu_z(\theta_0) - \mu_z(\theta_i))]}{\sin(2\pi\nu_{z;0})} d\theta_i = \text{inv}$$

Магнитная жёсткость 1,6 Тл · м



Высокая суперпериодичность играет важную роль при накоплении пучка

Относительные возмущения β -функций:

- при магнитной жёсткости 1,6 Тл · м не превышает 3,7 %
- при магнитной жёсткости 25,2 Тл · м не превышает 2,7 %



Смещение бетатронных частот:

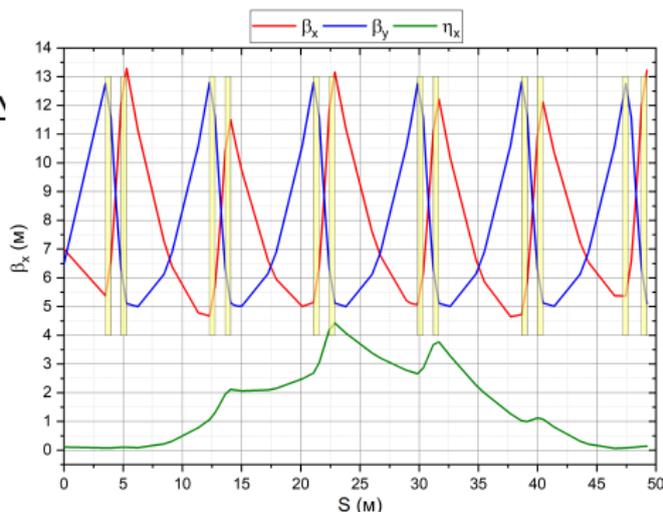
$$\Delta\nu_z \approx \frac{1}{4\pi} \sum_i \frac{\Delta(GL_{\text{eff}})_i \pm \langle GL_{\text{eff}} \rangle}{B\rho} \langle \beta_z \rangle_i \Delta$$

$$\Delta\nu_z^{\text{inj}} \approx -5,2 \cdot 10^{-3} \quad \Delta\nu_z^{\text{ext}} \approx -5,4 \cdot 10^{-3}$$

Хроматичность оптической системы:

$$\xi_x^{\text{inj}} \approx -5,6 \cdot 10^{-2} \quad \xi_x^{\text{ext}} \approx -8,1 \cdot 10^{-2}$$

$$\xi_y^{\text{inj}} \approx -1,4 \cdot 10^{-2} \quad \xi_y^{\text{ext}} \approx 0,8 \cdot 10^{-2}$$



Разброс частиц по бетатронным колебаниям:

$$\begin{cases} \Delta\nu_x^{\text{inj}} \approx -0,54\varepsilon_x + 1,18\varepsilon_y \\ \Delta\nu_y^{\text{inj}} \approx 1,18\varepsilon_x + 0,48\varepsilon_y \end{cases} \quad \begin{cases} \Delta\nu_x^{\text{ext}} \approx -0,51\varepsilon_x + 1,47\varepsilon_y \\ \Delta\nu_y^{\text{ext}} \approx 1,47\varepsilon_x + 0,44\varepsilon_y \end{cases}$$

В пределах акцептанса ускорителя:

$$\Delta\nu_x \approx -0,4 \cdot 10^{-4} \quad \Delta\nu_y \approx 7,7 \cdot 10^{-4}$$



Двумерная динамическая апертура

$$A_{\psi}^{da} = \int_0^{2\pi} \int_0^{R(\psi)} R dR d\psi \rightarrow \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_N [R_n(\psi)]^2 \equiv \langle R(\psi) \rangle \pi \text{ м} \cdot \text{рад}$$

На фазовой плоскости (x, p_x) :

- при 1,6 Тл · м: 160π мм · мрад
- при 25,2 Тл · м: 180π мм · мрад

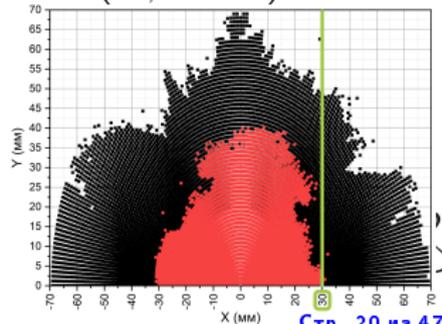
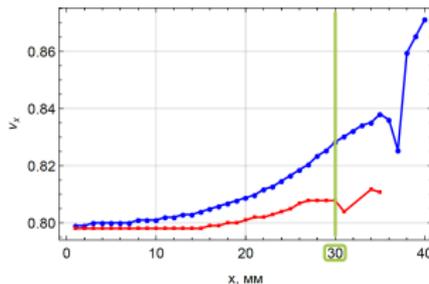
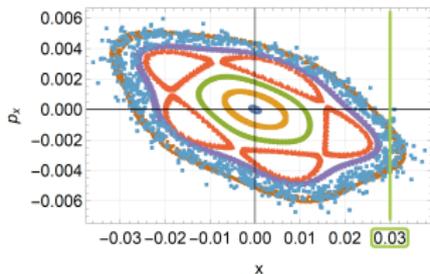
На фазовой плоскости (y, p_y) :

- при 1,6 Тл · м: 260π мм · мрад
- при 25,2 Тл · м: 250π мм · мрад

Четырехмерная динамическая апертура

$$A_{r,\theta}^{da} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} r(\theta) d\theta \rightarrow \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_N [r_n(\theta)]^2 \equiv \langle r(\theta) \rangle \text{ м}$$

- без секступольной коррекции: 37 мм (1,6 Тл · м) и 38 мм (25,2 Тл · м)
- при секступольной коррекции: 34 мм (1,6 Тл · м) и 36 мм (25,2 Тл · м)



Ошибки ведущего магнитного поля Бустера не оказывают значительного влияния на динамику циркулирующего и ускоряемого пучка ионов:

- ① Возмущения 3Ω , вызванные $\Delta k_1^b L_{\text{eff}}$ дипольных магнитов менее **2,0 мм** и **3,0 мм** (1,6 и 25,2 Тл · м)
- ② Относительные возмущения β -функций, вызванные $\delta k_2^b L_{\text{eff}}$ квадрупольных магнитов **4 %** и **3 %** (1,6 и 25,2 Тл · м)
- ③ Смещения бетатронных частот, вызванные $\Delta k_2^b L_{\text{eff}}$ менее **$2,0 \cdot 10^{-3}$** и **$5,4 \cdot 10^{-3}$** (дипольные и квадрупольные магнит)
- ④ Коэффициент возбуждения резонанса $\nu_x = \nu_y$ от $k_2^a L_{\text{eff}}$ дипольных магнитов $|\kappa^{(2)}| < 3,8 \cdot 10^{-3}$, резонанс не будет оказывать существенного влияния при отстройке $\Delta_r > 2 \cdot 10^{-2}$
- ⑤ Вклад $k_3^b L_{\text{eff}}$ дипольных магнитов в хроматичность определяющий: **-0,53/-0,46** и **5,90/5,68** (1,6 и 25,2 Тл · м). Оценки совпадают с предсказаниями разработанной модели с точностью **2–3 %**
- ⑥ При эмиттансе пучка в пределах адмиттанса влияние $k_4^b L_{\text{eff}}$ на разброс по бетатронным частотам частиц $\Delta \nu_{x/y} < (7,5/20,6) \cdot 10^{-4}$ и $(-0,4/7,7) \cdot 10^{-4}$ (дипольные и квадрупольные магнит)
- ⑦ Расчётная ДА превышает адмиттанс установки на уровне **10 %**

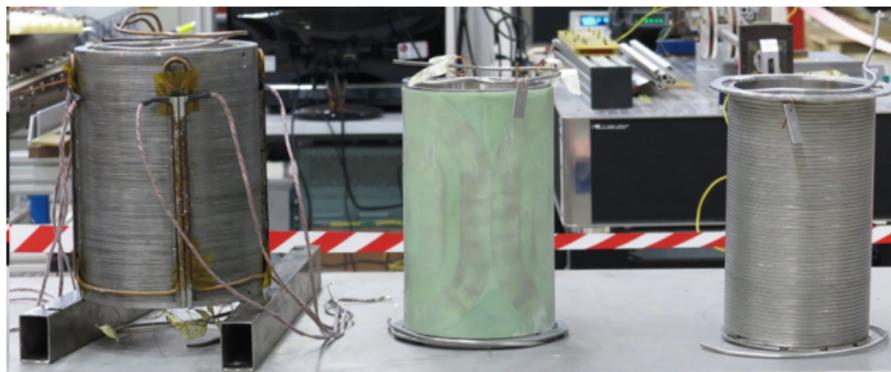
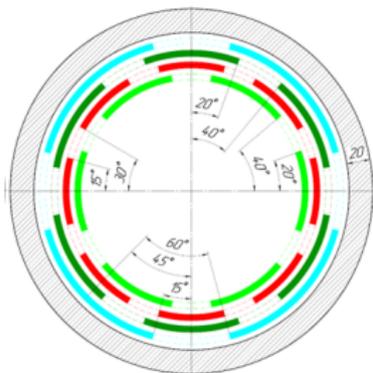
Для компенсации комплексного влияния этих эффектов и ошибок юстировки структурных элементов требуется развитая система коррекции



Система коррекции магнитного поля Бустера

«Гармоника» МП	Задача коррекции	Величина МП
«Прямой» диполь (B_1)	Горизонтальная ЗО	0,08 Тл
«Косой» диполь (A_1)	Вертикальная ЗО	0,08 Тл
«Косой» квадруполь (A_2)	Связь бетатронных колебаний	0,60 Тл/м
«Прямой» секступоль (B_3)	Хроматичность	50 Тл/м ²
«Косой» секступоль (A_3)	Влияние резонансов	50 Тл/м ²
«Прямой» октуполь (B_4)	Влияние краевых полей	600 Тл/м ³

Магнит-корректор — неявнополюсный СП-магнит с секторными обмотками



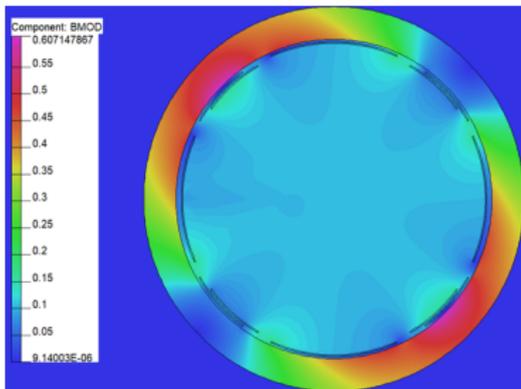
Моделирование магнитных полей [4]

Расчётные величины МП (Тл) на $r_{\text{ref}} = 30$ мм (Обмотка + Железное ярмо)

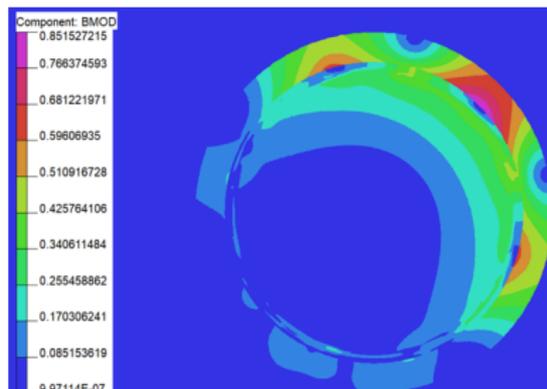
Тип расчёта	B_1/A_1	A_2	B_3/A_3	B_4
Аналит.	0,072 04	0,032 39	0,013 42	$3,321 \cdot 10^{-3}$
МКЭ	0,073 34	0,032 32	0,013 36	$3,313 \cdot 10^{-3}$
δ , %	1,78	0,21	0,42	0,17
Кол-во Ампер—витков	5500	4200	3900	2400

* — $\delta = (|B_{\text{FEM}} - B_{\text{analyt}}|) / B_{\text{FEM}} \cdot 100\%$

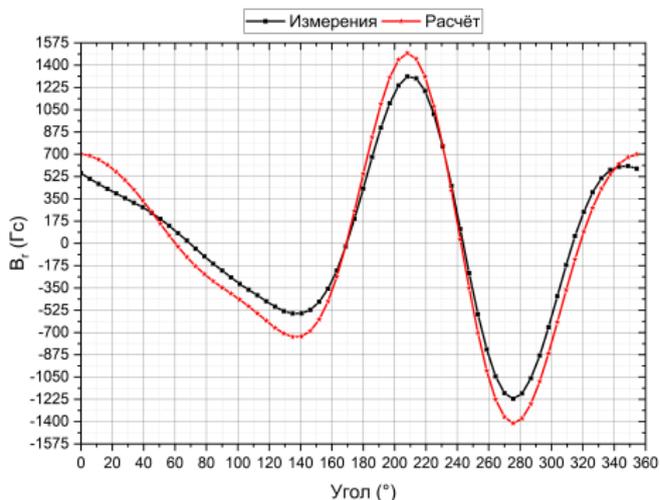
** — Аналит. модель: з-н Био-Савара-Лапласа и метод «отраженных» токов



ДК



МПК



Величина МП (Гс) на $r_{\text{meas}} = 41$ мм (82 А)

«Гармоника» МП	ХМИ	МКЭ 2D	$\delta, \%$
A_2	738,0	787,8	6,32
B_3	347,0	329,8	5,22
A_3	340,9	324,1	5,18
B_4	151,7	139,8	8,51

Система измерений



Анализ основных характеристик системы коррекции магнитного поля Бустера

Выполнены аналитические оценки возможностей системы коррекции и предложены соответствующие цепи:

① Коррекция равновесной замкнутой орбиты

- $\theta_{\max} = \begin{cases} 15,6 \text{ мрад (1,6 Тл} \cdot \text{м)}, \\ 1,0 \text{ мрад (25,2 Тл} \cdot \text{м)}; \end{cases} \theta/I = \begin{cases} 0,40 \text{ мрад} \cdot \text{А}^{-1} \text{ (1,6 Тл} \cdot \text{м)}, \\ 0,03 \text{ мрад} \cdot \text{А}^{-1} \text{ (25,2 Тл} \cdot \text{м)} \end{cases}$
- Метод локального искажения (бампа) орбиты
- Метод обратной матрицы [5]
- Метод сингулярного разложения (SVD) матрицы [5]
- Метод наименьших квадратов [5]
- Метод гармонической коррекции [5]
- Учтены технические ограничения источников питания ($I_{\min}, I_{\max}, \dots$)

② Коррекция хроматичности оптической системы

③ Коррекция связи бетатронных колебаний, секступольных и октупольных резонансов

④ Коррекция разброса бетатронных частот



Сводная таблица коррекции резонансов порядка N (для 1,6/22,5 Тл · м)

Резонанс	$\kappa^{(N)}$	$\kappa^{(N)}/I, \text{A}^{-1}$
$\nu_x = \nu_y$	$\frac{1}{2\pi} \int k_2^a R \left(\frac{\beta_x}{2R}\right)^{1/2} \left(\frac{\beta_y}{2R}\right)^{1/2} e^{i(\bar{\theta}_x - \bar{\theta}_y)} ds$	$(2,20/0,14) \cdot 10^{-3}$
$3\nu_{x/y} = 14$	$\frac{1}{2\pi} \frac{(-1)}{3!} \int k_3^{b/a} R \left(\frac{\beta_{x/y}}{2R}\right)^{3/2} e^{ip\bar{\theta}_{x/y}} \cdot ds$	$(-3,89/-2,52) \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1}$
$2\nu_x + \nu_y = 14$	$\frac{1}{2\pi} \frac{1}{2!} \int k_3^a R \left(\frac{\beta_x}{2R}\right) \left(\frac{\beta_y}{2R}\right)^{1/2} e^{i(2\nu_x \bar{\theta}_x + \nu_y \bar{\theta}_y)} \cdot ds$	$(-3,89/-5,04) \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1}$
$\nu_x + 2\nu_y = 14$	$\frac{1}{2\pi} \frac{1}{2!} \int k_3^b R \left(\frac{\beta_x}{2R}\right)^{1/2} \left(\frac{\beta_y}{2R}\right) e^{i(\nu_x \bar{\theta}_x + 2\nu_y \bar{\theta}_y)} \cdot ds$	$(-7,78/-2,52) \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1}$
$4\nu_x = 19$	$\frac{1}{2\pi} \frac{(-1)}{4!} \int k_4^b R \left(\frac{\beta_x}{2R}\right)^2 e^{ip\bar{\theta}_x} \cdot ds$	$(-11,6/-0,75) \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-2}$

Коррекция разброса бетатронных частот (A^{-1})

Ф-линза

Д-линза

$$1,6 \text{ Тл} \cdot \text{м} : \begin{cases} \Delta\nu_x = -2,30\varepsilon_x + 2,30\varepsilon_y, \\ \Delta\nu_y = 2,30\varepsilon_x - 0,58\varepsilon_y \end{cases}$$

$$\begin{cases} \Delta\nu_x = -0,58\varepsilon_x + 2,30\varepsilon_y, \\ \Delta\nu_y = 2,30\varepsilon_x - 2,30\varepsilon_y \end{cases}$$

$$25,2 \text{ Тл} \cdot \text{м} : \begin{cases} \Delta\nu_x = -0,15\varepsilon_x + 0,15\varepsilon_y, \\ \Delta\nu_y = 0,15\varepsilon_x - 0,04\varepsilon_y \end{cases}$$

$$\begin{cases} \Delta\nu_x = -0,04\varepsilon_x + 0,15\varepsilon_y, \\ \Delta\nu_y = 0,15\varepsilon_x - 0,15\varepsilon_y \end{cases}$$



Проведён цикл работ по **моделированию и измерению** МП корректоров [4]:

- 1 Создана аналитическая модель корректора для расчёта требуемого тока питания обмотки в зависимости от необходимой величины МП на уровне точности **5 %** и учесть влияние железного ярма
- 2 Расчёты МКЭ показали согласие с предсказаниями аналитической модели на уровне **< 2 %** для ДК и **< 0,5 %** для МПК
- 3 Полученные результаты ХМИ четырёх МПК показали сходимость с предсказаниями двумерного моделирования на уровне **< 15 %**

Показана возможность системы корректировать **следующие эффекты**:

- 1 Возмущения ЗО **± 10 мм** до уровня **$\pm 1,5$ мм** [5]
- 2 Хроматичность оптической системы
- 3 Связь бетатронных колебаний
- 4 Нелинейные резонансы до 4-го порядка
- 5 Разброс бетатронных частот

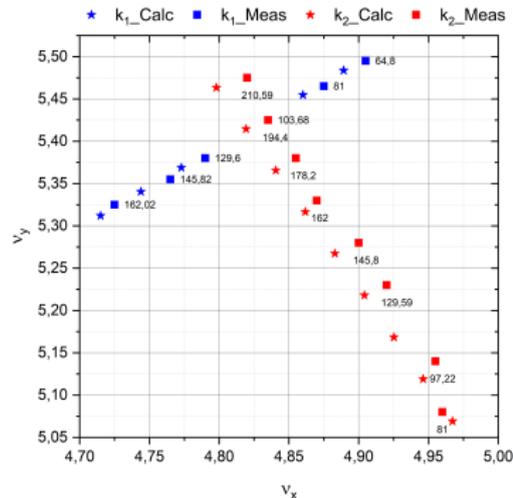
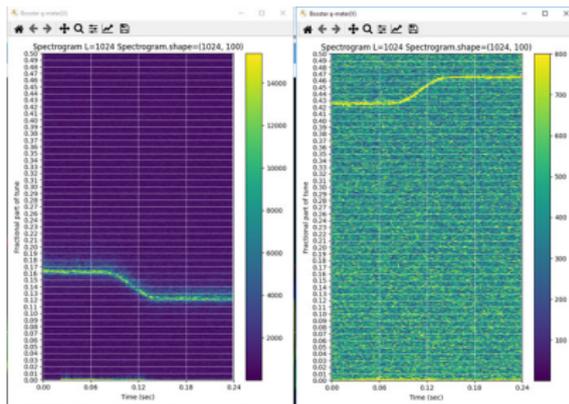
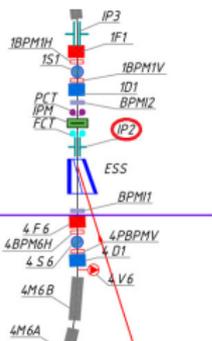
Выполненные расчёты и измерения магнитных полей показывают соответствие выбранной конструкции корректирующих магнитов предъявляемым требованиям формирования магнитного поля. Разработанные аналитические модели могут использоваться в ПО системы управления установки



Работа системы коррекции

Измерения дробной части поперечных бетатронных частот с помощью анализа спектра когерентных колебаний пучка по данным МПП (ПНР № 2):

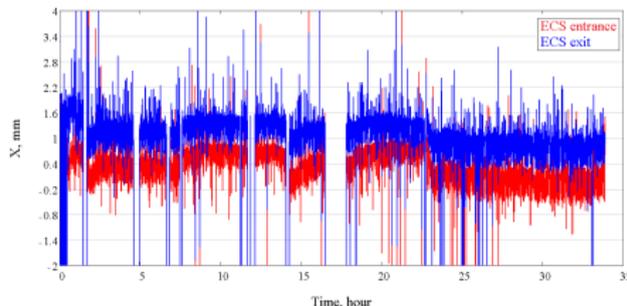
- ${}^4\text{He}^{1+}$, 200 МэВ/у, 6078,4 Гс
- Рабочий ток:
 - $I_F = I_{\text{dip}} - k_1 I_{\text{dip}}$
 - $I_D = I_{\text{dip}} - k_1 I_{\text{dip}} + k_2 I_{\text{dip}}$
- $\begin{cases} \nu_x = 4,73-4,96; \\ \nu_y = 5,08-5,48 \end{cases}$
- $|\nu_{\text{calc}} - \nu_{\text{meas}}| \approx 1-2 \%$



Показания МПП в период ПНР № 4 на энергии пучка 3,2 МэВ/и

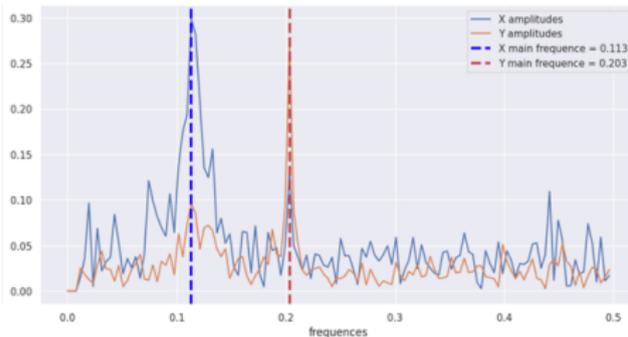
Для 9 тыс. рабочих циклов (> 24 ч):

- СКО гор. **0,4–1,0 мм**
- СКО верт. **менее 0,2 мм**



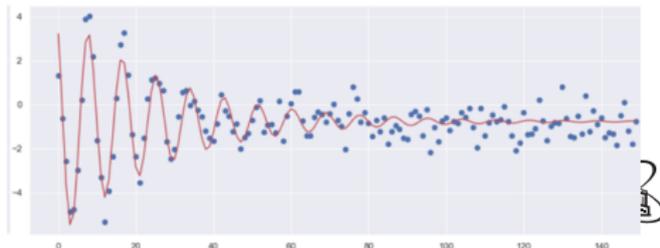
$\nu_{x/y}$

- Измерения: 0,11/0,20
- Модель: 0,17/0,22



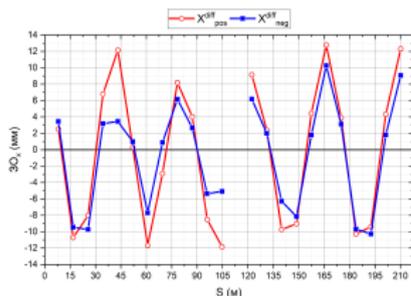
$\xi_{x/y}$

- Измерения: -5,39/-3,00
- Модель: -5,67/-6,12
- $y = Ae^{-\lambda t} \cos(\omega x + \varphi) + b$

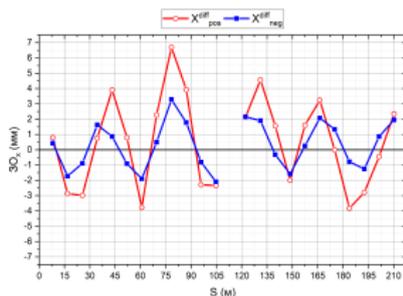


Метод дифф. орбит. Матрица отклика орбиты

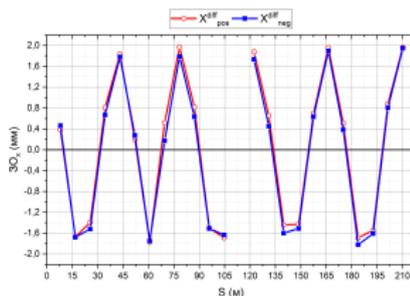
Корректор 2S1H. Рабочая точка: $\nu_x/\nu_y = 4,88/5,39$ [6]



$t = 300$ мс



$t = 500$ мс



$t = 700$ мс

По определению:

$$Z_i^{\text{diff}} = Z_i^{\text{pert}} - Z_i^{\text{init}}$$

- Реализовано и апробировано ПО автоматического измерения МОО
- Время измерений на Бустере составило $\approx 30-40$ мин (время цикла $3,2$ с)

$$\begin{pmatrix} R_{xx} & R_{xy} \\ R_{yx} & R_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta_x \\ \theta_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \text{ или } \vec{z} = \mathbf{R}\vec{\Theta},$$

$$\text{где } R_{zz;ij} = \frac{Z_i^{\text{diff}}}{\theta_{z;j}}, \quad R_{xy;ij} = \frac{X_i^{\text{diff}}}{\theta_{y;j}},$$

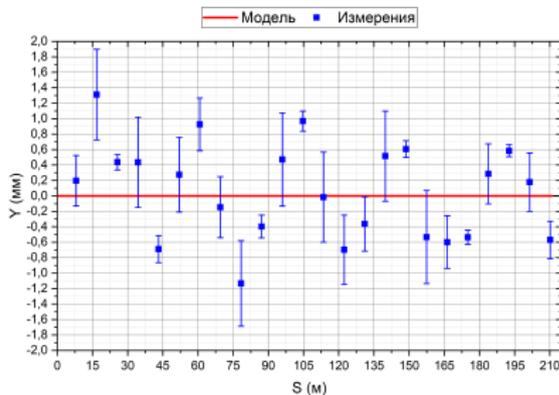
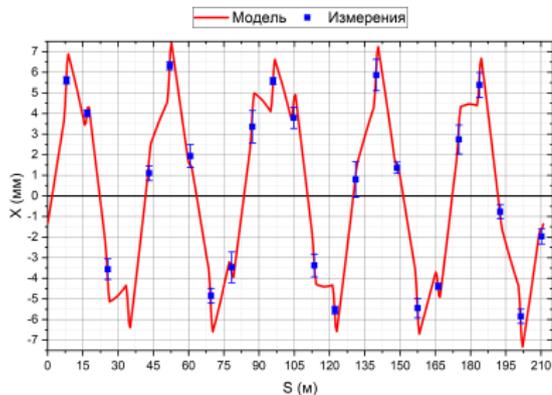
$$R_{yx;ij} = \frac{Y_i^{\text{diff}}}{\theta_{x;j}}$$



Связь бетатронных движений [6]

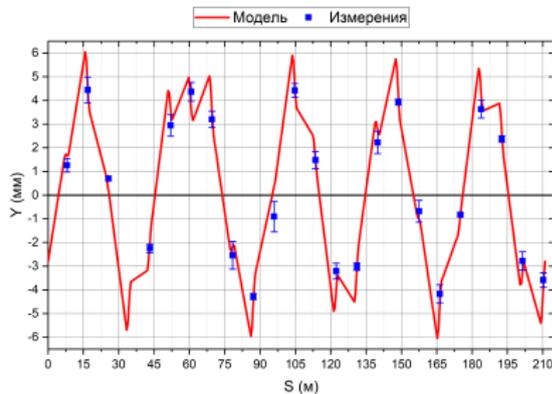
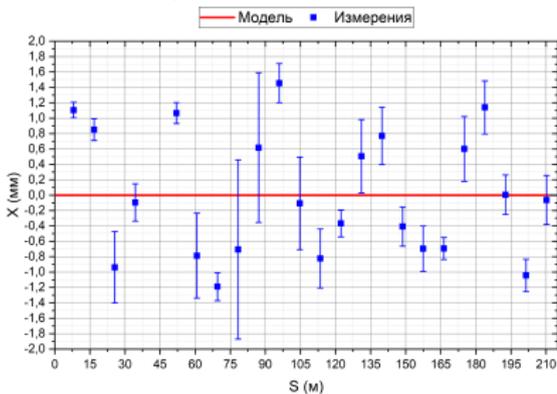
Рабочий ток ± 1 A

Горизонтальный корр.



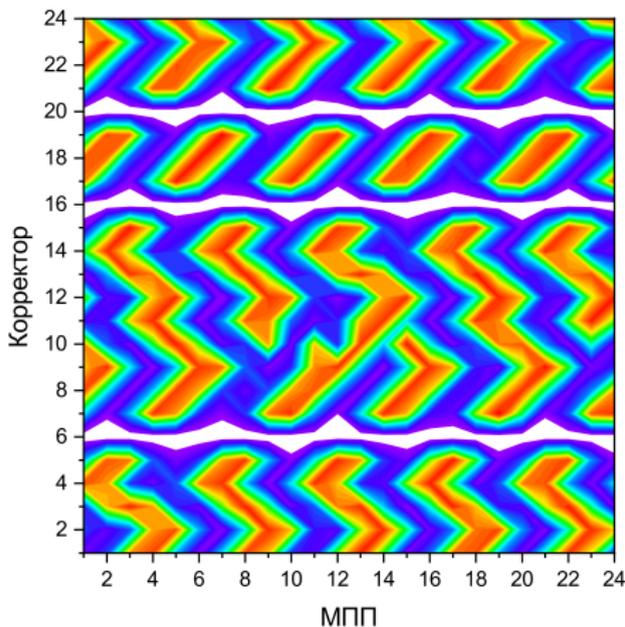
Согласие с предсказаниями модели с относительной точностью $< 3\%$

Вертикальный корр.

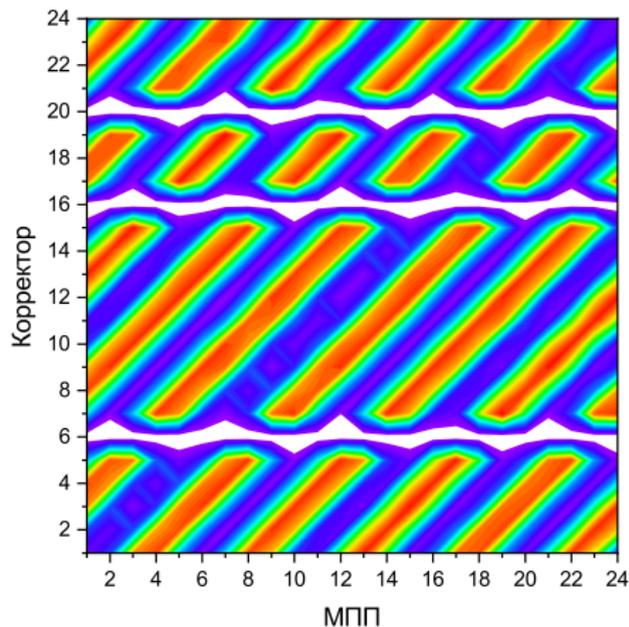


Полярность корректирующих магнитов [6]

Исходная коммутация ИП

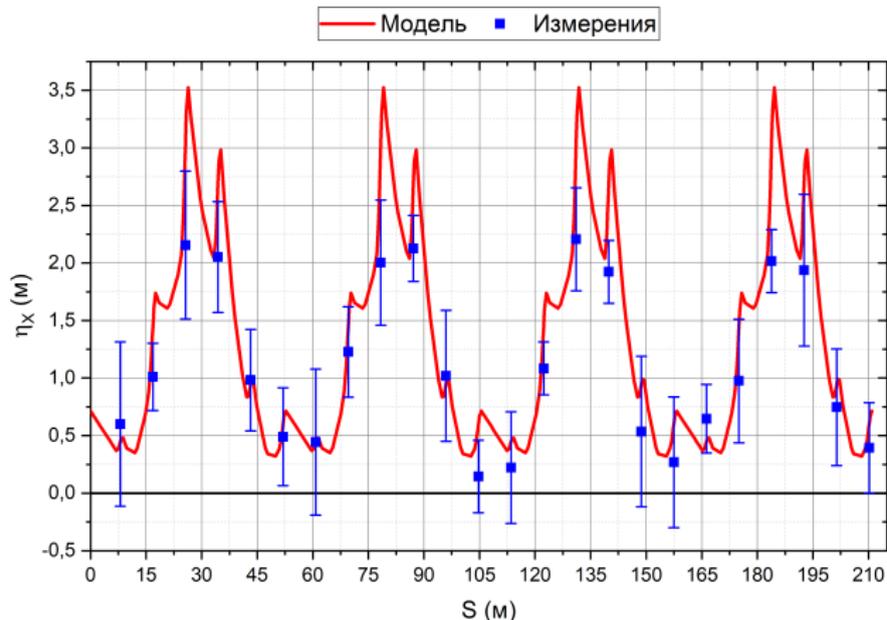


Проектная коммутация ИП



Восстановлена проектная полярность подключения источников питания к обмоткам **четырёх** корректоров





$$\Delta X(s) = \eta_x(s) \frac{\Delta p}{p}$$

$$\Leftrightarrow$$

$$\eta_x(s) = -\kappa \frac{\Delta X(s)}{\Delta f/f_0},$$

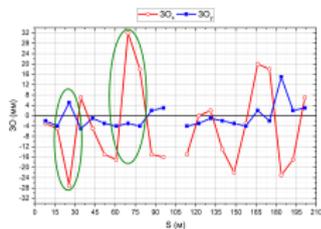
$$\kappa = \alpha - 1/\gamma^2$$

- Согласованность с моделью на участках с $\eta_x(s) > 1$ м с точностью $< 3\%$
- Коррекция ЗО **повышает** точность измерений и сходимость с моделью

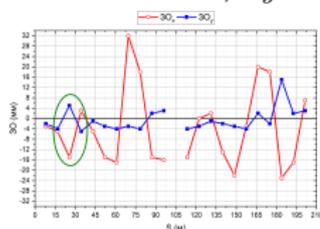
$\Delta f/f_0$ — изменение частоты обращения; α — коэффициент расширения орбит



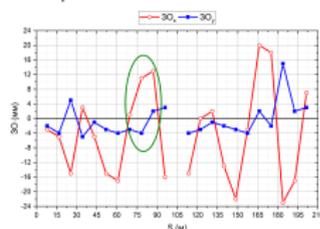
$$\nu_x/\nu_y = 4,88/5,39$$



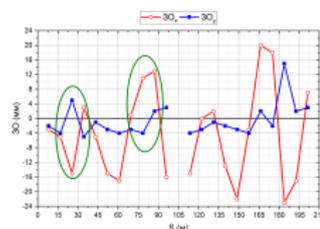
Без коррекции



МПП № 3

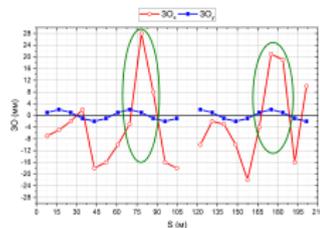


МПП № 9

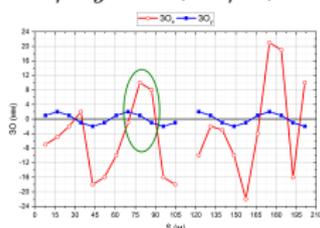


МПП № 3 и 9

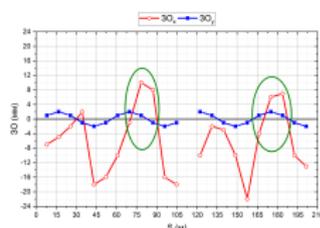
$$\nu_x/\nu_y = 4,80/4,85$$



Без коррекции



МПП № 9

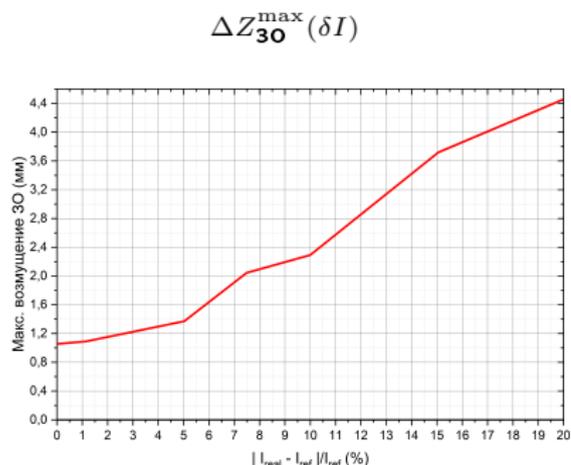
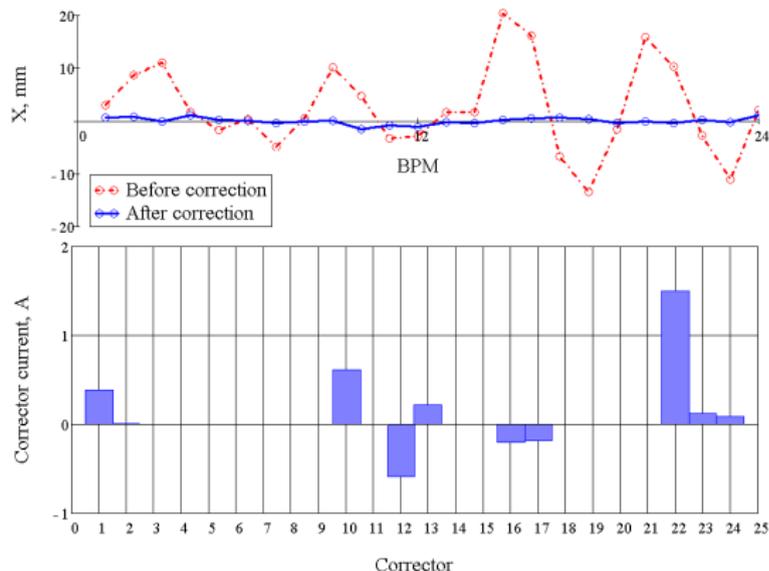


МПП № 9 и 20

- ПНР № 3, пучок $^{12}\text{C}^{4+}$
- Рабочий ток $< \pm 3 \text{ A}$ (1,86 мрад)
- Локальная коррекция возмущений ЗО на величину $\approx 10 \text{ мм}$
- Неисправность в работе МПП № 13 — показания не показаны



Глобальная коррекция ЗО. Моделирование [6]

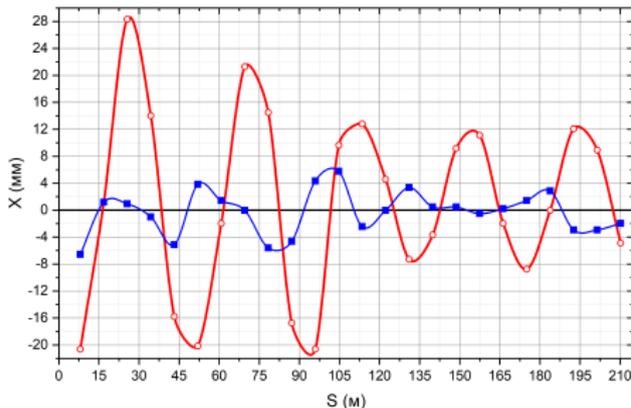


- Пучок $^{12}\text{C}^{4+}$ на энергии 3,2 МэВ/и
- Измеренная МОО, алгоритм SVD
- Глобальная коррекция ЗО на величину $\leq 1,05$ мм (9 корректоров)
- Максимальное возмущение ЗО после коррекции $\pm 2,00$ мм при относительной ошибке 7,5 %



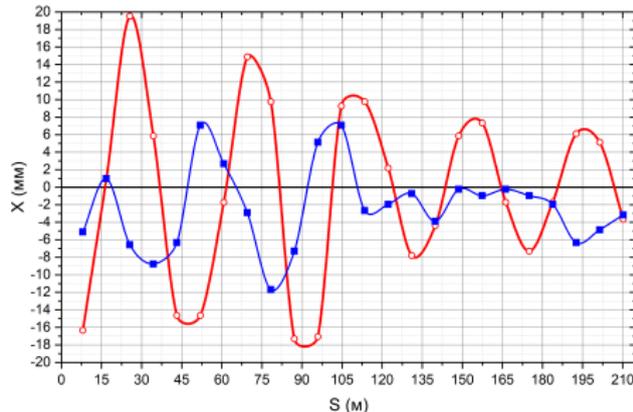
Энергия инжекции

—○— До —■— После



Энергия вывода

—○— До —■— После

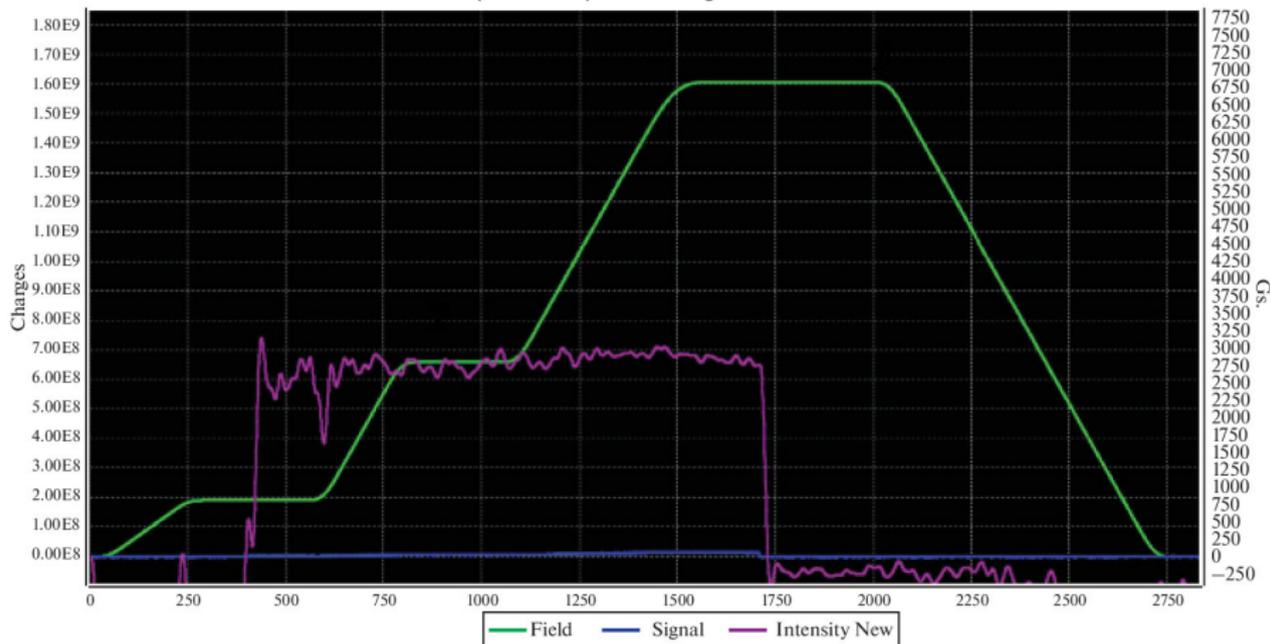


Выполнена коррекция орбиты во всём диапазоне рабочих энергий:

- ПНР № 4, $^{124}\text{Xe}^{28+}$
- Энергия инжекции: ± 6 мм
- Энергия вывода: ± 12 мм
- Ограничения:
 - неработоспособность трёх ДК
 - технические ограничения на минимальный рабочий ток $\pm 0,3$ А (энергия инжекции)



16.01.2023 17:50:47
 $Z/A = 28/124 \text{ Binj} = 810 \text{ Gs}$

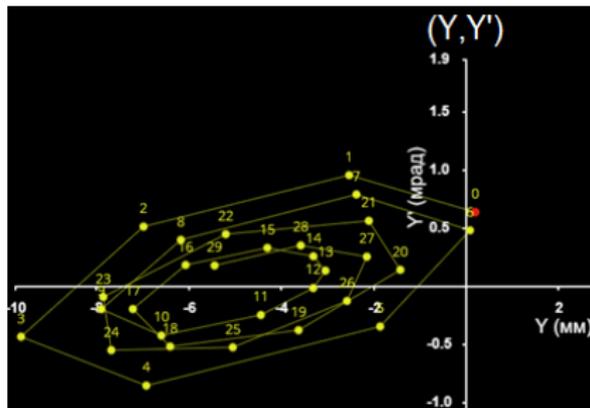
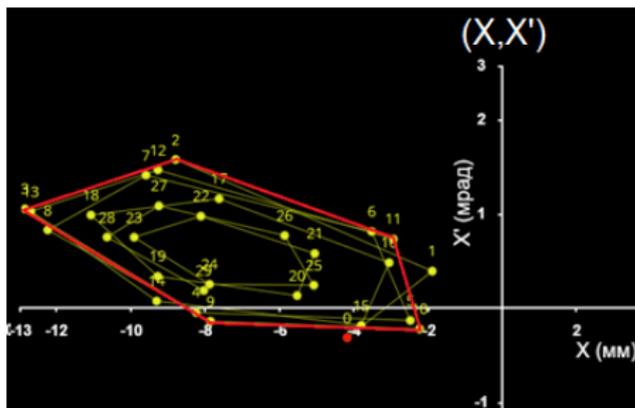


Получен режим циркуляции и ускорения пучка ионов $^{124}\text{Xe}^{28+}$ с минимальными потерями



Настройка рабочих параметров установки [6; 7]

$$\nu_x/\nu_y = 4,80/4,85$$



- Расчётные величины рабочих токов питания квадрупольных магнитов
- Дробные части бетатронных частот $\nu_x/\nu_y \approx 0,80/0,85$

Настройки положения рабочей токи в сеансе ПНР № 4 ($\nu_x/\nu_y = 5,17/5,20$) выполнено по результатам расчётов с использованием разработанной математической модели



Выполнены измерения оптических функций, исследования магнитооптических характеристик и настройка систем Бустера NICA :

- 1 Исследование зависимости положения рабочей точки от токов питания квадрупольных магнитов
- 2 Оценка повторяемости показаний измерений МПП за 9 тыс. циклов ускорения (более 24 ч)
- 3 Исследования когерентных колебаний на первых оборотах после инъекции пучка
- 4 Отлажена методика, разработано и внедрено ПО для измерения дифф. орбит и МОО. Проведена проверка полярности корректоров и получена МОО для дальнейших работ по коррекции орбиты
- 5 Экспериментально показана возможность коррекции ЗО реализован режим «динамической» коррекции (впервые на комплексе NICA)
- 6 Показана возможность настройки рабочей точки используя разработанную модель

Разработанная модель с точностью $< 10\%$ описывает физические процессы при работе ускорителя. Продемонстрирована возможность её использования для предсказаний и настройки рабочих режимов, а также показывают **возможность** и **необходимость** проведения аналогичных работ на других установках комплекса NICA



- 1 Создана математическая модель Бустера на основе данных измерений магнитных характеристик всех его структурных элементов. Модель описывает динамические характеристики установки на уровне точности **10 %**, что является достаточным для настройки ускорителя
- 2 На основе данных измерений магнитных характеристик всех структурных элементов, выполнен анализ влияния погрешностей ведущего магнитного поля Бустера на динамику циркулирующего и ускоряемого пучка
- 3 Выполнен расчёт динамической апертуры ускорителя с учётом всех ошибок ведущего магнитного поля. Показано превышение динамического акцептанса над геометрическим на уровне **10 %**. Результаты подтверждают правильность основных концептуальных решений, заложенных на этапе разработки и создания магнитооптической системы
- 4 Экспериментально измерены характеристики дифф. орбит «Бустера» и настроена система коррекции ведущего магнитного поля. Возмущения скорректированной орбиты составили не более **± 6 мм** (энергия инжекции) и **± 12 мм** (энергии вывода)
- 5 Создана двумерная аналитическая модель, позволяющая рассчитать требуемый рабочий ток в обмотке магнита-корректора в зависимости от необходимой величины магнитного поля на уровне точности **5 %**
- 6 Накопленный опыт и разработанное ПО позволяет проводить аналогичные исследования на синхротронах и каналах транспортировки пучка ускорительного комплекса NICA



- Математическая модель магнитооптической структуры Бустера на основе данных измерений магнитных характеристик всех его структурных элементов
- Результаты расчётов влияния ошибок магнитного поля Бустера на динамику циркулирующего и ускоряемого пучка на основе данных измерений магнитных характеристик всех его структурных элементов
- Результаты расчётов динамической апертуры с учётом всех ошибок ведущего магнитного поля
- Результаты экспериментальной проверки физических характеристик системы коррекции ведущего магнитного поля Бустера
- Соответствие результатов измерений с предсказаниями математического моделирования на уровне точности 10 %



- Построена математическая модель Бустера на основе данных измерений магнитных характеристик его структурных элементов, описывающая динамические характеристики установки на уровне точности 10 %, что является достаточным для настройки ускорителя
- На основе данных измерений магнитных характеристик всех структурных элементов, впервые выполнен анализ влияния погрешностей ведущего магнитного поля Бустера на динамику циркулирующего и ускоряемого пучка
- Создана двумерная аналитическая модель, позволяющая рассчитать требуемый рабочий ток в обмотке корректора в зависимости от необходимой величины магнитного поля на уровне точности 5 %



- Разработана методика расчёта динамической апертуры ускорителя и зависимостей бетатронных частот от начальных амплитуд частиц в пучке, с учётом выявленных ошибок ведущего магнитного поля
- Разработана методика исследования проверки полярности подключения источников питания корректоров
- Впервые на инжекционном комплексе NICA реализована динамическая коррекция ЗО во всём диапазоне рабочих энергий Бустера
- Проведен физический пуск стартовой конфигурации системы коррекции ведущего МП. Получена циркуляция пучка и проведена компенсация возмущений ЗО при параметрах, близких к проектным



1. Magnetic Measurements of the NICA Booster Superferric Magnets. /. — V. V. Borisov [et al.] // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. — 2018.
2. Serial magnetic measurements of quadrupole magnets of the NICA booster synchrotron. /. — A. V. Shemchuk [et al.] // Physics of Particles and Nuclei Letters. — 2018.
3. Шандов, М. М. — Моделирование динамической апертуры бустерного синхротрона комплекса NICA на основе данных магнитных измерений. /. — М. М. Шандов, С. А. Костромин // Письма в журнал физика элементарных частиц и атомного ядра. — 2022.
4. Корректирующие магниты Бустера и Коллайдера NICA. /. — М. М. Шандов [и др.] // Письма в журнал физика элементарных частиц и атомного ядра. — 2020.
5. Шандов, М. М. — Алгоритмы коррекции орбиты Бустера NICA. /. — М. М. Шандов, С. А. Костромин // Ядерная физика и инжиниринг. — 2023.



6. Исследование характеристик магнитной структуры Бустера NICA в сеансах пусконаладочных работ с пучком в 2020–2022 гг. /. — М. М. Шандов [и др.] // Письма в журнал физика элементарных частиц и атомного ядра. — 2023.
7. *Коробицина, М. Ю.* — Настройка инжекции в Бустер ускорительного комплекса NICA. /. — М. Ю. Коробицина, А. В. Тузиков, М. М. Шандов // Письма в журнал физика элементарных частиц и атомного ядра. — 2023.



- XXV Russian Particle Accelerator Conference, RuPAC–2016, SPbSU, Petergof, Saint Petersburg, Russia, 2016;
- 8th International Particle Accelerator Conference, IPAC–2017, Copenhagen, Denmark, 2017;
- 25th International Conference on Magnet Technology, MT–25, Amsterdam, Netherlands, 2017;
- XII Международный семинар по проблемам ускорителей заряженных частиц: проблемы коллайдеров и ускорителей заряженных частиц. Ускорители для прикладных целей, Алушта, Крым, 2017;
- 9th International Particle Accelerator Conference, IPAC–2018, TRIUMF, Vancouver, Canada, 2018;
- XXVI Russian Particle Accelerator Conference, RuPAC–2018, IHEP, Protvino, Russian Federation, 2018;
- XIII Международный семинар по проблемам ускорителей заряженных частиц: проблемы коллайдеров и ускорителей заряженных частиц. Ускорители для прикладных целей, Алушта, Крым, 2019;



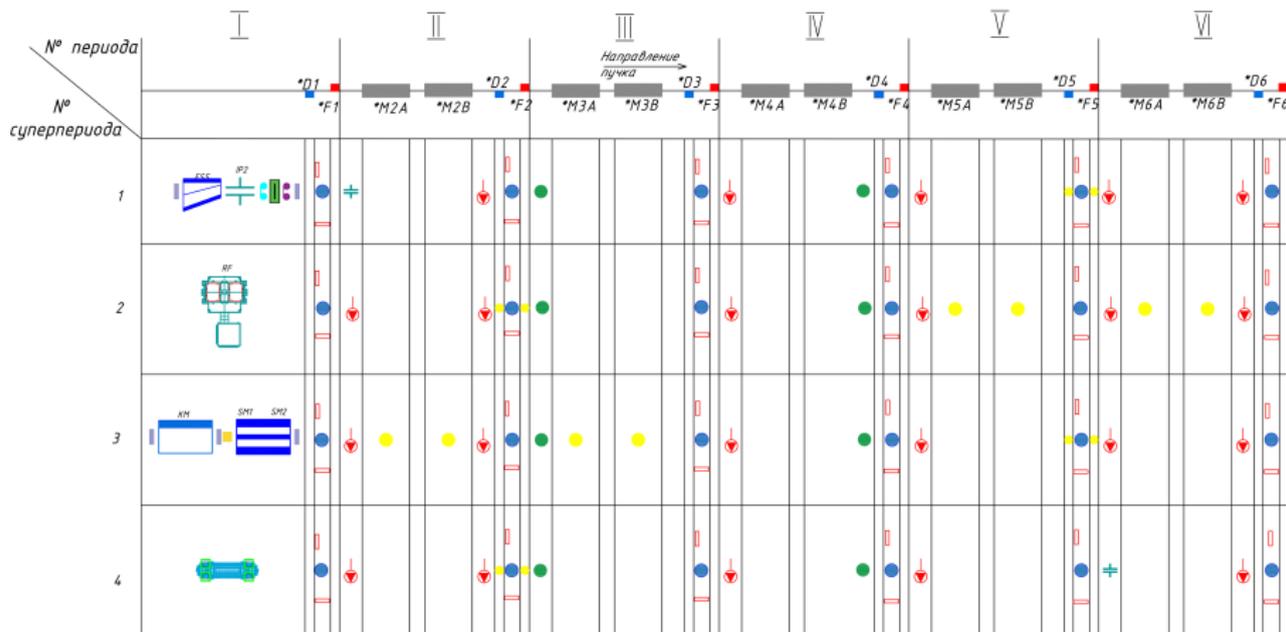
- JINR association of young scientists and specialists conference «Alushta–2022», Алушта, Крым, 2022;
- XIV Международный семинар по проблемам ускорителей заряженных частиц: проблемы коллайдеров и ускорителей заряженных частиц. Ускорители для прикладных целей, Алушта, Крым, 2022;
- XXVI International scientific conference of young scientists and specialists, AYSS–2022, Dubna, Russia, 2022



Спасибо за внимание!

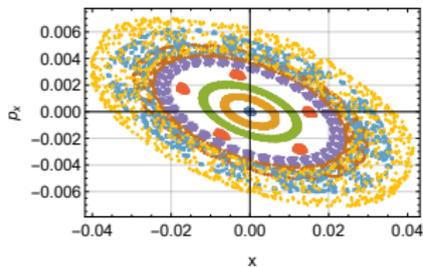
Дополнительные материалы

Магнитооптическая структура ускорителя

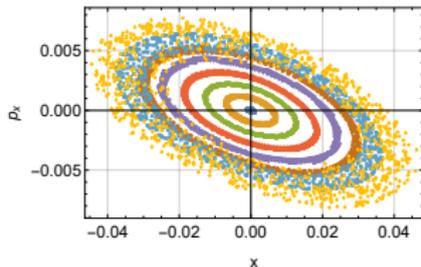


Магнитная жёсткость 25,2 Тл·м

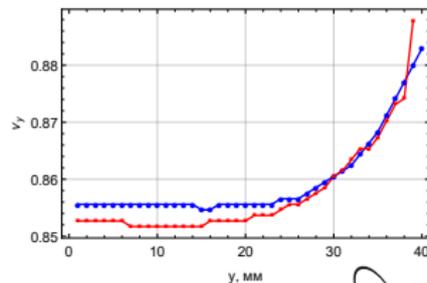
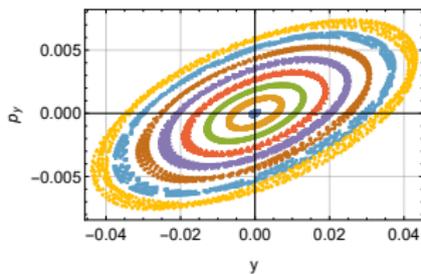
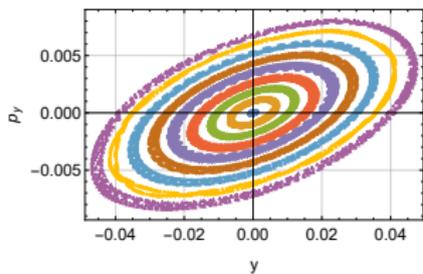
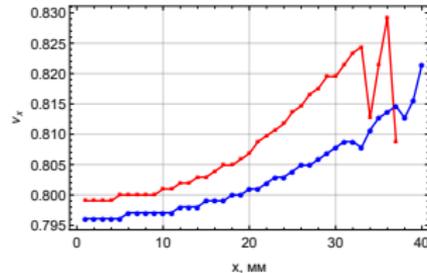
Секст. выкл.



Секст. вкл.



$$\nu_{x/y} = f(x/y)$$



$$\frac{\xi_{x/y}}{I}(1,6 \text{ Тл} \cdot \text{м}) = \begin{cases} 0,12/ - 0,06 \text{ А}^{-1} \text{ Ф-линза,} \\ -0,08/0,17 \text{ А}^{-1} \text{ Д-линза;} \end{cases}$$
$$\frac{\xi_{x/y}}{I}(25,2 \text{ Тл} \cdot \text{м}) = \begin{cases} (7,78/ - 3,89) \cdot 10^{-3} \text{ А}^{-1} \text{ Ф-линза,} \\ (-4,86/10,69) \cdot 10^{-3} \text{ А}^{-1} \text{ Д-линза.} \end{cases}$$



$$3\nu_{x/y} = 14$$

$$\frac{\Delta_r^{\min}}{I}(15\pi \text{ мм} \cdot \text{мрад}) = \begin{cases} -3,67 \cdot 10^{-4} \text{ А}^{-1} (1,6 \text{ Тл} \cdot \text{м}), \\ -2,38 \cdot 10^{-5} \text{ А}^{-1} (25,2 \text{ Тл} \cdot \text{м}). \end{cases}$$

$$\frac{\Delta_r^{\min}}{I}(150\pi \text{ мм} \cdot \text{мрад}) = \begin{cases} -1,16 \cdot 10^{-3} \text{ А}^{-1} (1,6 \text{ Тл} \cdot \text{м}), \\ -7,52 \cdot 10^{-5} \text{ А}^{-1} (25,2 \text{ Тл} \cdot \text{м}). \end{cases}$$



Благодарность

Костромину С. А., Мешкову И. Н., Лебедеву В. А., Михайлову В. А.,
Тузикову А. В., Филиппову А. В., Бутенко А. В., Сидорину А. О.,
Сыресину Е. М., Хабаровой Е. М., Жабицкому В. М., Коробициной М. Ю.,
Кунченко О. А., Николайчуку И. Ю., Смирнову В. Л., коллективу Отделения
№ 1 ЛФВЭ, Борисову В. В., Голубицкому О. М., Донгузову И. И.,
Золотых Д. А., Бычков А. В., Кондратьеву Б., Парфило Т., сотрудникам
группы магнитных измерений НЭОСМиТ, Донягину А. М.,
Никифорову Д. Н., Шемчуку А. В., коллективу НЭОСМиТ, Ворониной Е. В.,
Бобровскому А. В., Долгому С. А., Ходжибагияну Г. Г., Андрееву В. А.,
Горбачеву Е. В., Романову С. В., Седых Г. С., коллективу НТОП,
Лёзину Д. А., Шандовой Е. Ю., сотрудникам НМИЦ ССХ им.
А. Н. Бакулева

Автор также благодарит всех, кто оказывал поддержку в ОИЯИ и сделал
настоящую работу автора возможной.

