

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МАГНИТНОЙ СТРУКТУРЫ БУСТЕРА NICA В СЕАНСАХ ПУСКОНАЛАДОЧНЫХ РАБОТ С ПУЧКОМ В 2020–2022 ГГ.

*М. М. Шандов^{а,1}, Е. В. Горбачев^а, М. Ю. Коробицина^а,
С. А. Костромин^{а,б}, В. А. Лебедев^а, И. Ю. Николайчук^а,
Г. С. Седых^{а,б}, В. Л. Смирнов^а, А. В. Тузиков^а, Е. Д. Цыплаков^а*

^а Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

^б Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

Инжекционная цепочка коллайдера NICA включает различные источники ионов, 2 линейных ускорителя, новый сверхпроводящий бустерный синхротрон с максимальной магнитной жесткостью 25 Тл·м, существующий сверхпроводящий синхротрон нуклотрон и каналы транспортировки пучков. Сборка бустерного синхротрона была завершена в 2020 г., а в декабре проведен первый сеанс пусконаладочных работ с пучком ионов. Завершено три сеанса пусконаладочных работ с различными ионными пучками. Представлены основные этапы настройки и результаты исследования магнитооптических характеристик ускорителя и параметров пучков в ходе этих сеансов.

The injection chain of the NICA collider consists of various ion sources, two linear accelerators, a 25 T·m superconducting (SC) Booster synchrotron, the existing SC synchrotron Nuclotron and beam transfer lines. Construction of the Booster synchrotron was finished in 2020 and the first machine run with ion beam was successfully carried out in December. Three commissioning runs with various ion beams have been successfully completed. The tuning processes, the study of the beam parameters and optical characteristics of the Booster during these runs are presented.

PACS: 07.05.Bx; 07.05.Hd; 07.05.Kf; 07.05.Tp; 07.50.-e; 29.20.-c; 29.20.D-; 29.20.Lq; 29.27.-a; 29.27.Bd; 41.85.-p; 41.85.Lc

ВВЕДЕНИЕ

Первой сверхпроводящей установкой в ускорительной цепочке тяжелых ионов комплекса NICA (Nuclotron-Based Ion Collider fAcility) [1] является новый бустерный синхротрон (бустер) [2] с максимальной магнитной жесткостью 25 Тл·м и периметром 210,96 м. Описание магнитооптической структуры и рабочие параметры установки можно найти в работах [2–6]. Оптические функции суперпериода ускорителя

¹E-mail: Shandov@jinr.ru

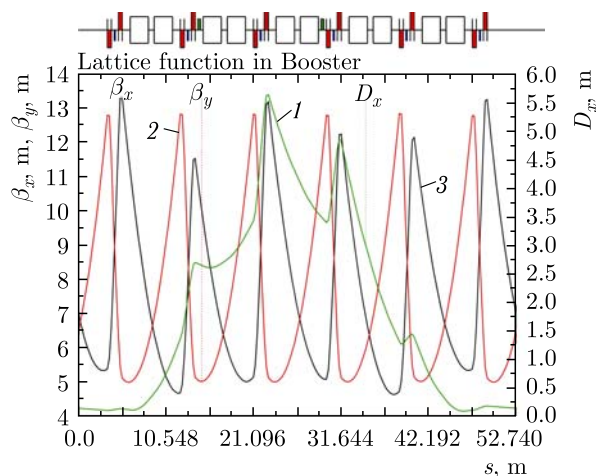


Рис. 1 (цветной в электронной версии). Оптические функции суперпериода бустера при энергии вывода. Цветом на структуре выделены следующие магниты: зеленый (1) — мультипольный корректирующий, красный (2) — квадрупольный, синий (3) — дипольный корректирующий

показаны на рис. 1. С начала ввода установки в эксплуатацию было проведено три сеанса пусконаладочных работ (ПНР) (последний при работе с базовой установкой нуклотрон и дальнейшим выводом ускоренного пучка на физический эксперимент) с пучками ионов ${}^4\text{He}^{1+}$, ${}^{56}\text{Fe}^{14+}$, ${}^{12}\text{C}^{4+}$.

ИЗМЕРЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ РАБОЧЕЙ ТОЧКИ

В рамках сеанса ПНР №2 была опробована методика измерения дробной части поперечных бетатронных частот с помощью анализа спектра когерентных колебаний пучка по данным монитора положения пучка (МПП, BPM — англ.) [7]. Данная методика ранее уже применялась в исследованиях на нуклотроне [8].

Для возбуждения когерентных колебаний пучка в горизонтальной плоскости на инфлекторные пластины IP2 (рис. 2, слева), установленные в прямолинейном промежутке участка инжекции бустера, подавался когерентный со сгустком сигнал случайной амплитуды. Полученный в результате действия инфлекторных пластин «удар» прикладывался к сгустку как целому (сигнал имел прямоугольную форму длиной в сгусток), а его амплитуда менялась случайным образом для каждого сгустка. Затем выполнялось преобразование Фурье данных с МПП, полученных за 2^N оборотов, и анализировался полученный спектр (см. рис. 2, справа). Как видно из приведенных спектров, при возбуждении когерентных колебаний в горизонтальной плоскости также наблюдалось возбуждение осцилляций и в вертикальной, что, с одной стороны, указывает на наличие в магнитооптической структуре элементов, приводящих к появлению связи горизонтального и вертикального бетатронных движений, а с другой — сделало возможным измерять дробную часть вертикальной бетатронной частоты.

Измерения дробной части частот проводились с пучком ${}^2\text{He}^{1+}$ энергией 200 МэВ/нуклон путем изменения рабочих токов источников разбаланса дипольных

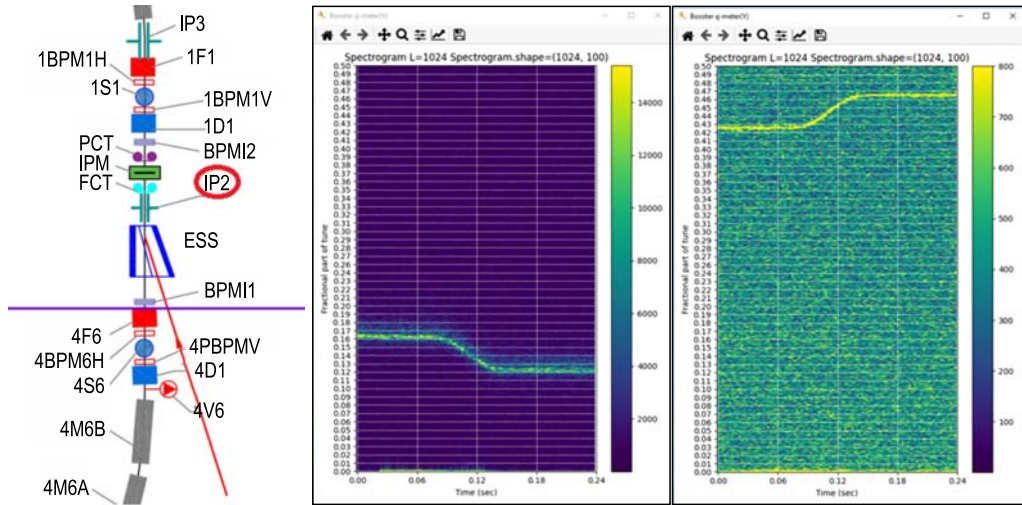


Рис. 2 (цветной в электронной версии). Место расположения IP2 (показано красным) на прямолинейном участке инжекции бустера (слева) и пример измеренных спектров горизонтальных (в центре) и вертикальных колебаний (справа)

и квадрупольных магнитов (I_F) и фокусирующих и дефокусирующих квадрупольных магнитов (I_D). Управление источниками осуществляется с помощью задания соответствующих коэффициентов k_1 и k_2 , связанных с токами питания следующими соотношениями:

$$I_F = I_{dip} - k_1 I_{dip}$$

и

$$I_D = I_{dip} - k_1 I_{dip} + k_2 I_{dip},$$

где I_{dip} — ток питания дипольных магнитов. Влияние изменения коэффициента k_1 и k_2 на плато магнитного поля на дробную часть бетатронных частот представлено на рис. 2, справа.

Изменение коэффициентов $k_1 = 0,020–0,050$ и $k_2 = 0,025–0,065$ позволило исследовать положение рабочей точки в области $\nu_x = 4,73–4,96$ и $\nu_y = 5,08–5,48$. Сравнение результатов с полученными при расчетах с использованием математической модели бустера в программном комплексе MAD-X [9] (расчетные значения показаны звездочками на рис. 3) показало сходимость с точностью $|\nu_{calc} - \nu_{meas}| \approx 1–2\%$. Дальнейшие исследования планируются с использованием разрабатываемого Q-метра.

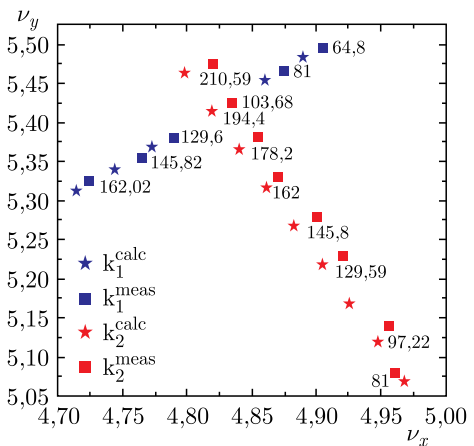


Рис. 3 (цветной в электронной версии). Измеренные (квадраты) и расчетные (звездочки) положения рабочей точки при изменении рабочих токов источников I_F (синий график) и I_D (красный график), указанные рядом с измеренной точкой

ИЗМЕРЕНИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ОРБИТ

В период сеанса ПНР №3 выполнены исследования дифференциальных орбит, целью которых было проведение предварительных измерений оптических функций бустера NISA. Во время проведения исследований был решен ряд задач, таких как разработка методики эксперимента, требуемого ПО, проведение измерений дифференциальных орбит в горизонтальной и вертикальной плоскостях, верификация математической модели установки с целью получения параметров, обеспечивающих корреляцию расчетных и экспериментальных результатов.

Под дифференциальной орбитой будем понимать разницу между исходной (не возмущенной) X_i^{init} и возмущенной X_i^{pert} орбитами:

$$X_i^{\text{diff}} = X_i^{\text{pert}} - X_i^{\text{init}}.$$

В качестве возмущения здесь может использоваться включение дипольного корректирующего магнита, изменение рабочей частоты ВЧ и т. д.

Методика измерений состоит в следующем: после измерения невозмущенной орбиты $X_{\text{pos}}^{\text{init}}$ создается возмущение и измеряется возмущенная орбита $X_{\text{pos}}^{\text{pert}}$, затем возмущение снимается, измеряется невозмущенная орбита $X_{\text{neg}}^{\text{init}}$ и повторяются измерения с возмущением противоположного знака $X_{\text{neg}}^{\text{pert}}$, после чего выполняется проверка $X_{\text{pos}}^{\text{diff}} = -X_{\text{neg}}^{\text{diff}}$.

Автоматическая система управления (АСУ) бустера реализована на базе системы Tango Controls [10] в виде трех уровней: уровня доступа к оборудованию; сервисного уровня (сбор данных и первичная их обработка) и клиентского уровня (предоставляет оператору средства для управления и диагностики). Для реализации измерения дифференциальных орбит необходимо ПО, имеющее следующий функционал: снятие показаний МПП; управление корректирующими магнитами (корректорами); управление ускоряющей (ВЧ) системой; отображение показаний датчиков интенсивности циркулирующего пучка (быстрый (FCT) и параметрический (PCT) трансформаторы тока). ПО должно не только осуществлять отображение текущего состояния устройства управления, но и иметь функцию записи данных во внешний файл.

В рамках подготовки к проведению измерений выполнена отладка ПО управления системой коррекции и получения данных с МПП, а также разработано и внедрено недостающее ПО, имеющее описанный выше функционал. Для чтения и записи показаний МПП разработано специальное Tango-устройство и ПО для работы с ним. Измеренные значения с каждого из 24 МПП записывались каждые 100 мс после усреднения за соответствующий временной интервал. Временные интервалы записи измерений с привязкой к циклу основного магнитного поля бустера показаны на рис. 4. Поскольку измерения дифференциальных орбит необходимо было выполнить для всех 48 корректоров (24 горизонтальных и 24 вертикальных) для уменьшения вероятности ошибок со стороны оператора, было разработано дополнительное Tango-устройство для проведения измерений в автоматическом режиме без его участия.

Исследования выполнялись в рабочей точке $\nu_x/\nu_y = 4,88/5,39$. В качестве возмущений использовались корректирующие магниты и рабочая частота ВЧ-станции (для измерения функции дисперсии). Детальное исследование характеристик магнитооптической структуры бустера и настройка всего диапазона проектных параметров не входили в задачи исследования.

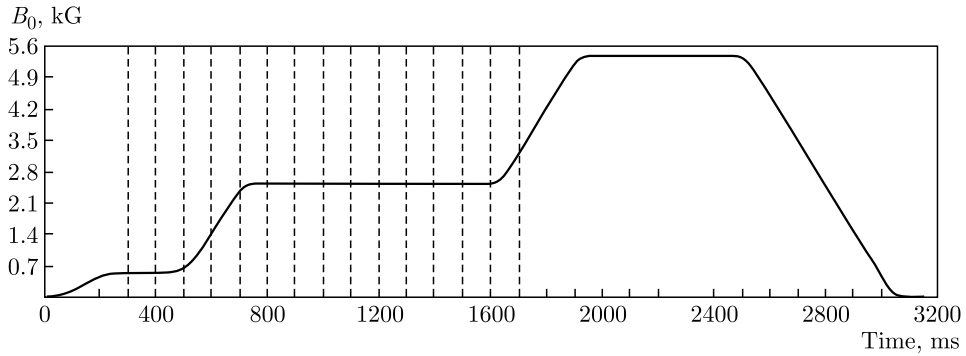


Рис. 4. Цикл магнитного поля бустера с указанием временных интервалов измерения показателей МПП

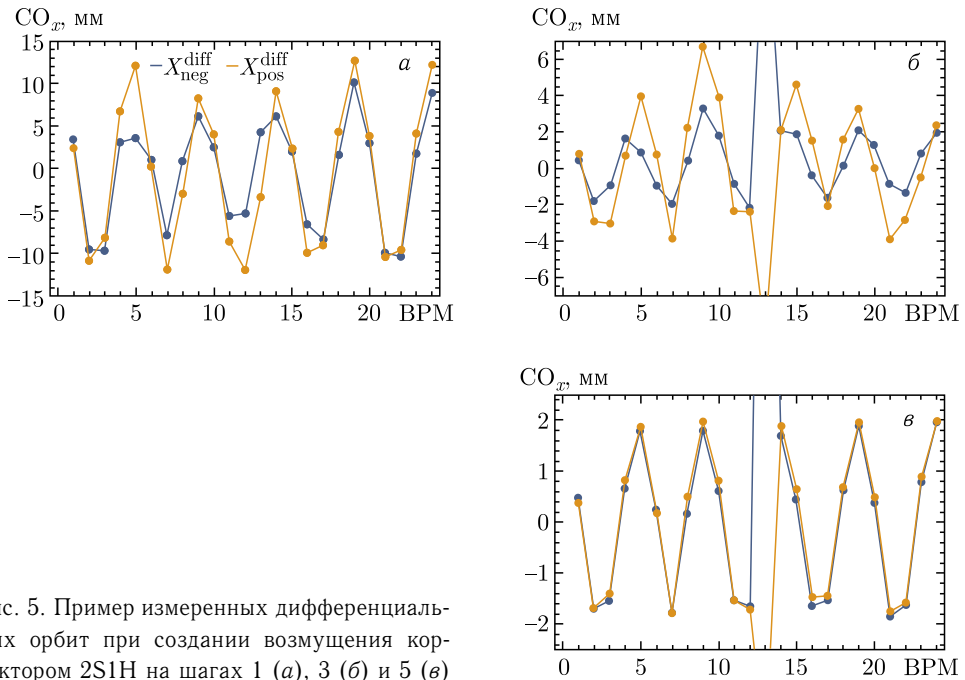


Рис. 5. Пример измеренных дифференциальных орбит при создании возмущения корректором 2S1H на шагах 1 (а), 3 (б) и 5 (в)

Анализ полученных дифференциальных орбит (рис. 5) показывает на первых шагах различие в измерениях при задании возмущения с противоположными знаками, что может быть связано с отличием энергий и/или энергетического разброса инжектируемого пучка между циклами. Включение ускоряющей системы бустера происходило на измерительном шаге № 3, а первый этап ускорения заканчивался на шаге № 5, и, как видно на рис. 5, условие $X_{pos}^{diff} = -X_{neg}^{diff}$ на этом шаге выполняется, что также свидетельствует о том, что различия $|X_{pos}^{diff}|$ и $|X_{neg}^{diff}|$ на первых шагах обусловлены недостаточной повторяемостью инжекции и энергетического разброса пучка, что компенсируется после ВЧ-захвата и первого этапа ускорения. В дальнейшем плани-

руется выполнить детальные исследования описанного эффекта и поиск причин его появления.

Другой важный результат, полученный в измерениях, — возможность обнаружения наличия связи горизонтального и вертикального движений, а также поиск источника этой связи. Результаты, приведенные на рис. 6, показывают, что при создании возмущения в горизонтальной плоскости (сверху) наблюдается возмущение замкнутой орбиты (ЗО, СО — англ.) и в вертикальной, аналогичным образом, при создании возмущения в вертикальной плоскости (снизу) наблюдается возмущение ЗО в горизонтальной. Анализ начальной фазы и амплитуды возмущенной ЗО в ортогональной плоскости позволяет определить не только наличие, но и место расположения элементов, приводящих к появлению связи движений. Данное исследование планируется выполнить в дальнейшем.

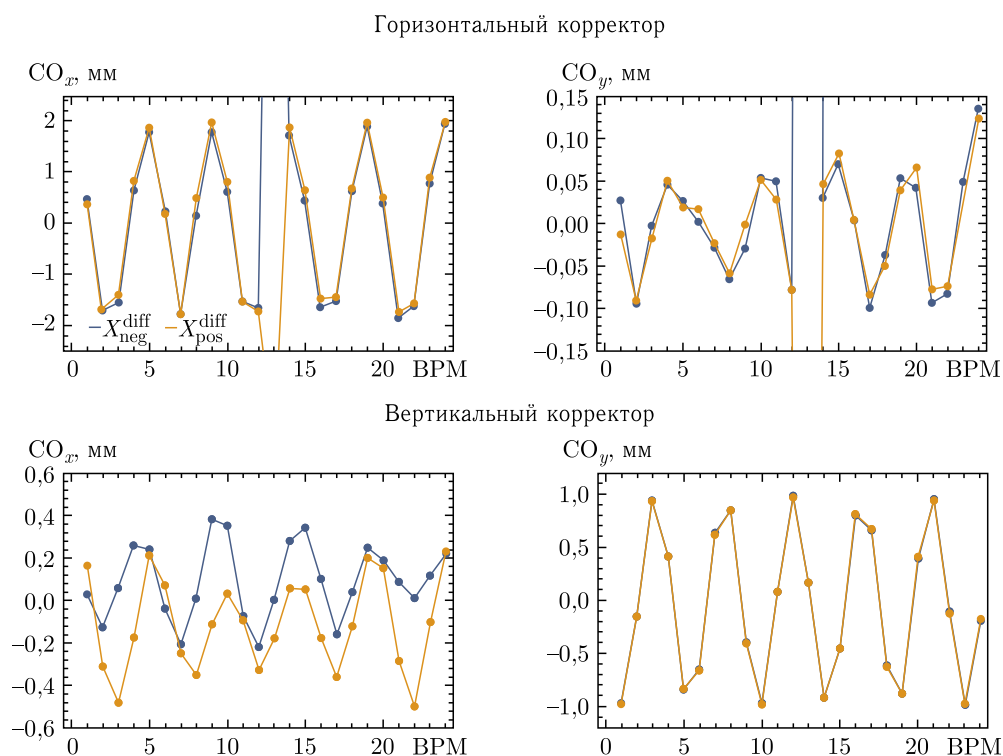


Рис. 6. Дифференциальные орбиты в горизонтальной (слева) и вертикальной (справа) плоскостях при создании возмущения горизонтальным (сверху) и вертикальным (снизу) корректорами

Комплексный анализ дифференциальных орбит, полученных в последовательном создании возмущения несколькими корректорами, позволяет выполнить проверку полярности подключения источников питания к обмоткам. Очевидно, что поскольку корректоры располагаются с некоторым смещением вдоль азимута установки, то и начальные фазы бетатронных колебаний возмущенной орбиты при включении этих корректоров также будут отличаться на соответствующую величину. Для комплекс-

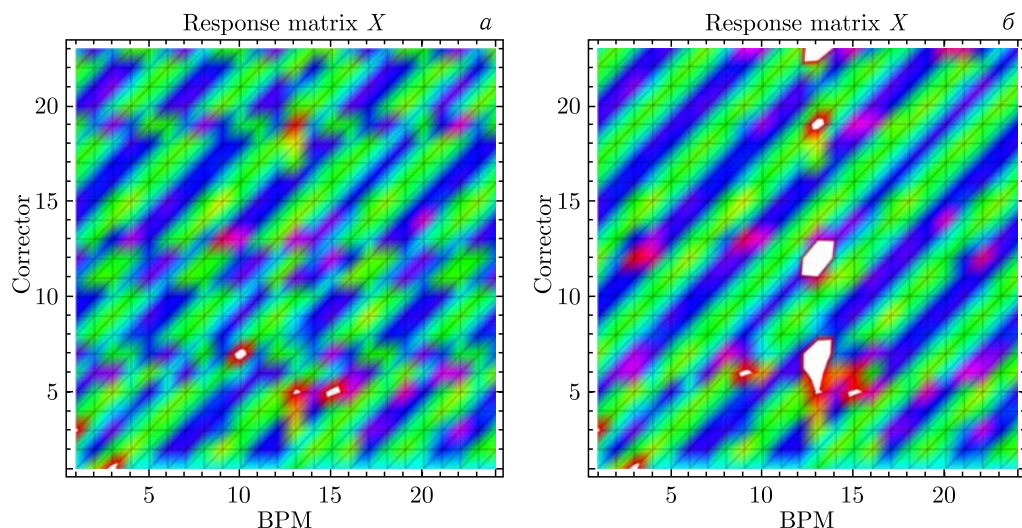


Рис. 7 (цветной в электронной версии). Набор дифференциальных орбит при задании возмущения различными корректорами до (а) и после (б) коррекции полярности подключения источников питания обмоток корректоров. По оси абсцисс отложены номера МПП, по оси ординат — корректоров

ного анализа удобно использовать графическое представление набора дифференциальных орбит в виде графика линий уровня (рис. 7). В приведенном случае по оси абсцисс отложены номера BPM (МПП), а по оси ординат — корректоров; зеленый цвет соответствует максимальному отклонению дифференциальной орбиты, синий — минимальному. Поскольку для текущей задачи такое графическое представление результатов является качественным, применения палитры высокого разрешения не требуется.

Как видно по первоначально измеренным данным (рис. 7, а), максимальные и минимальные значения дифференциальных орбит, полученные при работе корректоров под номерами 7, 11, 12, 19 и 23, имеют противоположный знак по отношению к соответствующему расположению корректора вдоль азимута установки, что свидетельствует об ошибке в подключении полярности источника питания обмоток данных корректоров. Измерения дифференциальных орбит с коррекцией выявленных ошибок в полярности подключения источников питания (рис. 7, б) показывают корректное соответствие начальной фазы бетатронных колебаний возмущенной орбиты расположению корректора вдоль азимута установки. Процесс измерения дифференциальных орбит бустера был автоматизирован с помощью разработанного ПО, что позволило измерять весь набор дифференциальных орбит за ≈ 30 –40 мин. Описанный метод позволил выявить нарушения полярности подключения пяти корректоров. В дальнейшем планируется провести аналогичные измерения корректирующих магнитов в вертикальной плоскости и на других установках (нуклотроне, коллайдере и каналах транспортировки пучка).

Нормировка измеренных дифференциальных орбит на соответствующую величину возмущения θ_z (или тока питания обмотки), созданного корректором, делает возмож-

ным построить матрицу отклика орбиты [11], определяемую следующим образом:

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

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

С использованием математической модели бустера, учитывающей результаты магнитных измерений [12], выполнено сравнение измеренных дифференциальных орбит с расчетными (рис. 8). Измеренные и расчетные дифференциальные орбиты совпадают с относительной точностью $< 1\%$ за исключением второго и седьмого МПП, показания которых имели большой разброс в процессе измерений (показано полосой погрешности у соответствующих маркеров), что может быть обусловлено ошибками синхронизации записи данных с указанных мониторов. Полученный результат свидетельствует о хорошей проработанности математической модели установки, что позволяет использовать ее для предсказаний и настройки рабочих режимов установки.

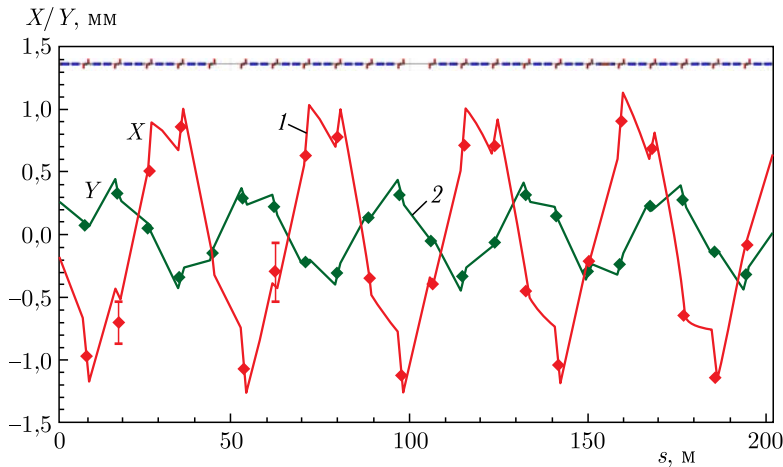


Рис. 8 (цветной в электронной версии). Измеренные (точки) и полученные в модели (сплошные линии) дифференциальные орбиты бустера в горизонтальной (красная, 1) и вертикальной (зеленая, 2) плоскостях

Возмущение ЗО для частиц с импульсом, отличным от равновесного, описывается дисперсионной функцией [13]:

$$\Delta x(s) = D_x(s) \frac{\Delta p}{p} \Leftrightarrow D_x(s) = -\eta \frac{\Delta x(s)}{\Delta f/f_0},$$

где $\eta = \alpha - 1/\gamma^2$; $\Delta f/f_0$ — изменение частоты обращения; α — коэффициент расширения орбит; γ — лоренц-фактор. Как видно из приведенных соотношений, используя при измерении дифференциальных орбит изменение рабочей частоты ВЧ-станции

бустера в качестве возмущения, возможно определить дисперсионную функцию в горизонтальной плоскости. При измерениях на энергии инжекции рабочая частота ВЧ-станции бустера изменялась в диапазоне $\Delta f = (580,25 \pm 1,58)$ кГц с шагом 0,53 кГц, что соответствует диапазону энергий $\Delta E = (3,144 \pm 0,018)$ МэВ/нуклон с шагом 0,006 МэВ/нуклон. Закон изменения рабочей частоты ВЧ-станции в процессе ускорения во время измерений оставался неизменным. Результаты измерений и моделирования дисперсионной функции показаны на рис. 9. Как видно, измеренные и расчетные данные также совпадают с относительной точностью $< 1\%$ на участках, где значение $D_x(s) > 1$ м. Такой результат также отражает хорошую проработанность математической модели установки. Расхождение результатов моделирования и измерений на участках с малой дисперсией ($D_x(s) < 1$ м) может быть обусловлено недостаточной точностью измерений, что планируется скорректировать в дальнейших работах.

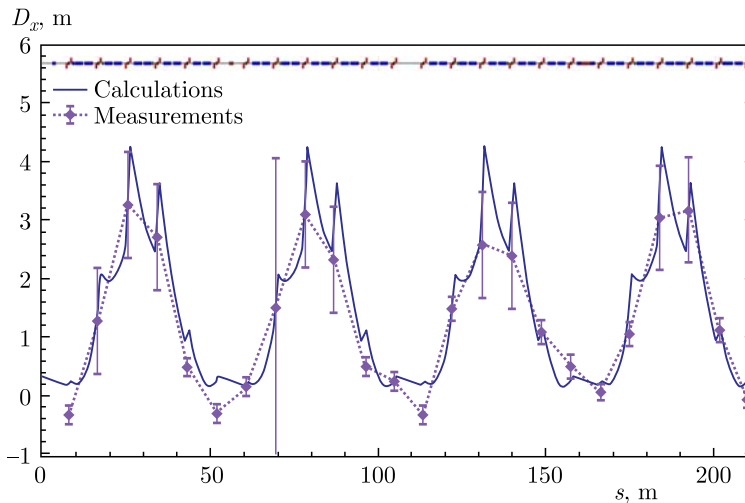


Рис. 9. Измеренная (точки) и полученная в модели (сплошные линии) горизонтальная дисперсионная функция

Оценка возможностей системы коррекции ЗО проводилась путем локального изменения (бампа) горизонтальной орбиты [14] в рабочих точках $\nu_x/\nu_y = 4,88/5,39$ (рис. 10) и $\nu_x/\nu_y = 4,80/4,85$ (рис. 11).

При локальной коррекции использованы рабочие токи до $< \pm 3$ А, что соответствует возмущению 0,15 мрад. Как видно из представленных результатов (см. рис. 10 и 11), удалось выполнить локальную коррекцию возмущений ЗО на величину ≈ 10 мм. При локальной коррекции в рабочей точке $\nu_x/\nu_y = 4,80/4,85$ выявлены неисправности в работе МПП № 13, показания данного МПП на рис. 11 не представлены.

Кроме локальной, авторами было проведено моделирование возможности глобальной коррекции возмущений ЗО с использованием измеренной матрицы отклика орбиты и алгоритма сингулярного разложения матриц (SVD) [15]. Данный алгоритм широко применяется при коррекции по измеренной (или полученной в расчетной модели) матрице отклика орбиты [16] в случае, если число МПП не равно числу корректоров.

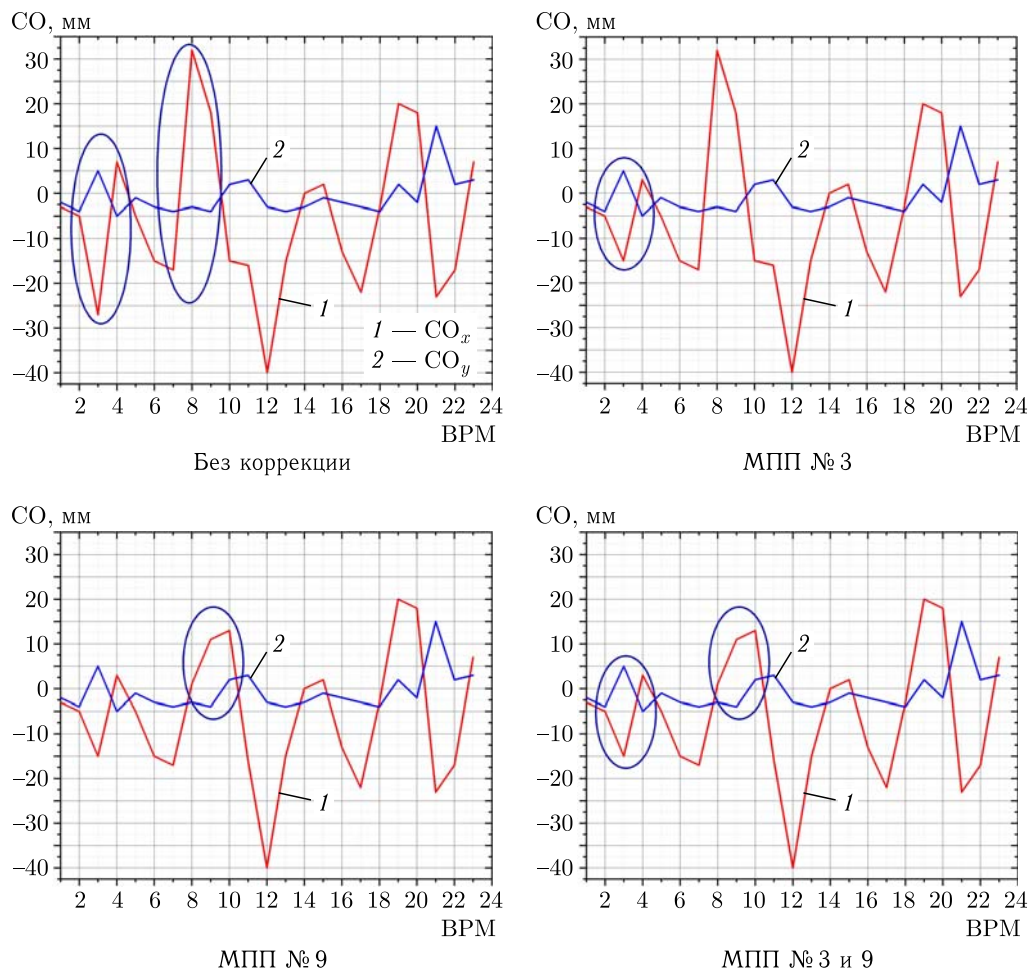


Рис. 10. Пример локальной коррекции горизонтальной (1) орбиты в рабочей точке $\nu_x/\nu_y = 4,88/5,39$. Указано место локальной коррекции

Проведенные оценки (рис. 12) показали, что имеющиеся возмущения ЗО для пучка ионов $^{12}\text{C}^{4+}$ на энергии 3,2 МэВ/нуклон (± 18 мм) могут быть скорректированы до $\leq 1,05$ мм даже при использовании неполного набора корректоров (9 шт.). Для реализации данного алгоритма подготовлена библиотека, позволяющая выполнять коррекцию ЗО в процессе всего цикла ускорения бустера (по результатам измерения возмущений ЗО на соответствующих энергиях), результаты работы которой планируются оценить в предстоящих сеансах с пучком.

Другим важным результатом при моделировании коррекции ЗО с помощью алгоритма SVD и с использованием измеренной матрицы отклика орбиты стала оценка влияния относительного отклонения отработанного рабочего тока питания обмоток корректора от заданной величины (см. рис. 13). Полученная зависимость показывает,

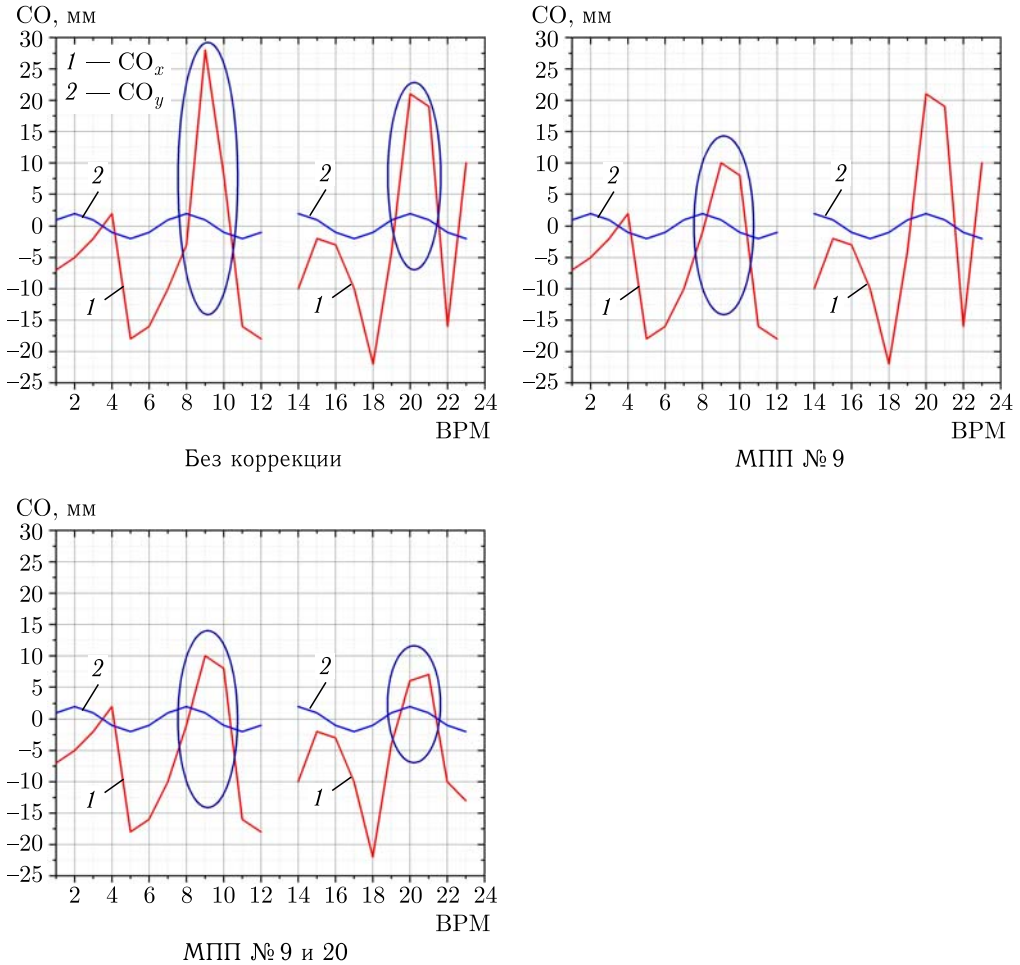


Рис. 11. Пример локальной коррекции горизонтальной (I) орбиты в рабочей точке $\nu_x/\nu_y = 4,80/4,85$. Указано место локальной коррекции

что при относительной ошибке 7,5% максимальное возмущение ЗО после коррекции составляет $\pm 2,00$ мм, что должно быть учтено в соответствующем ПО системы управления установкой.

Завершающим исследованием с использованием математической модели бустера было определение рабочих токов питания квадрупольных магнитов для настройки проектной рабочей точки $\nu_x/\nu_y = 4,80/4,85$ [6] при работе с пучком ионов $^{12}\text{C}^{4+}$ на энергии 3,2 МэВ/нуклон. Для оценки положения рабочей точки установки использовался монитор положений пучка в поперечной фазовой плоскости (см. рис. 14) [17], позволяющий восстанавливать в линейном приближении фазовые положения пучка на участке инжекции за первые 32 оборота и вычислять дробную часть бетатронной частоты по набегу соответствующей фазы на каждом обороте. После задания расчетных величин рабочих токов квадрупольных магнитов дробные части бетатронных

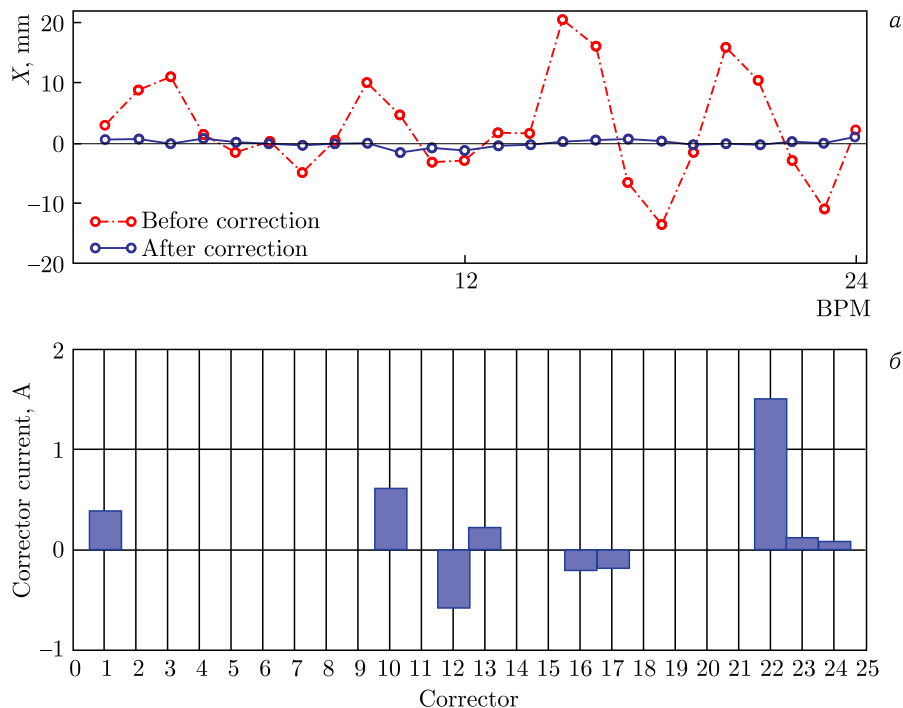


Рис. 12. Моделирование коррекции ЗО с помощью алгоритма SVD и с использованием измеренной матрицы отклика орбиты (а) и требуемые рабочие токи питания обмоток корректоров (б) при работе с пучком ионов $^{12}\text{C}^{4+}$ на энергии 3,2 МэВ/нуклон

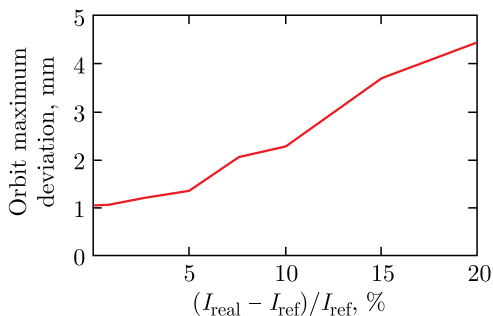


Рис. 13. Зависимость максимального значения ЗО после коррекции от относительного отклонения обработанного рабочего тока корректора от заданной величины

частот составили $\nu_x/\nu_y \approx 0,80/0,85$. Кроме того, наблюдалось искажение формы фазового «профиля» в горизонтальной плоскости при больших амплитудах, указывающего на расположение рабочей точки в окрестности соответствующего резонанса пятого порядка $24\nu_x = 5$ (см. рис. 14, слева). Небольшое количество измерений, используемое для вычислений, а также ошибки инжекции сильно сказываются на точности вычисления дробной части бетатронной частоты по набегу соответствующей фазы

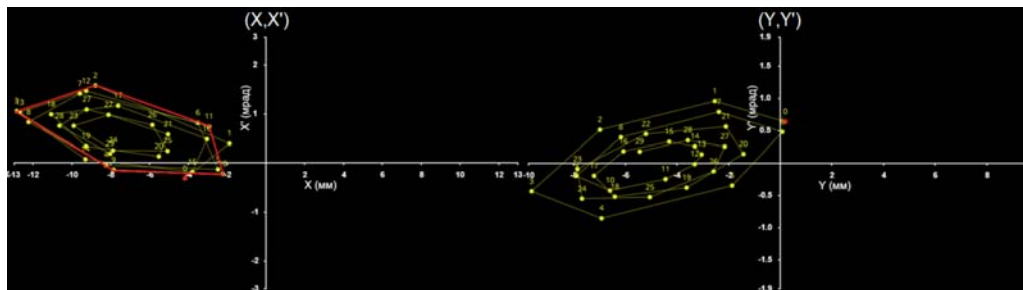


Рис. 14. Фазовые профили пучка ионов $^{12}\text{C}^{4+}$ на энергии 3,2 МэВ/нуклон в рабочей точке $\nu_x/\nu_y = 4,80/4,85$

на каждом обороте, для более точной настройки положения рабочей точки необходимо использование разрабатываемого Q-метра. Такие исследования на различных рабочих энергиях планируется провести в дальнейшем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С начала ввода установки в эксплуатацию было проведено три сеанса ПНР с пучками ионов $^4\text{He}^{1+}$, $^{56}\text{Fe}^{14+}$, $^{12}\text{C}^{4+}$. В период указанных работ выполнены предварительные измерения оптических функций, исследования магнитооптических характеристик и настройка систем бустерного синхротрона комплекса NICA.

С помощью методики измерения дробной части поперечных бетатронных частот путем анализа спектра когерентных колебаний пучка по данным МПП проведено исследование положения рабочей точки в области $\nu_x = 4,73\text{--}4,96$ и $\nu_y = 5,08\text{--}5,48$ при работе с пучком $^4\text{He}^{1+}$ на энергии 200 МэВ/нуклон. Сравнение результатов с расчетом в математической модели бустера в программном комплексе MAD-X показало сходимость с точностью $|\nu_{\text{calc}} - \nu_{\text{meas}}| \approx 1\text{--}2\%$.

В период ПНР №3 выполнено измерение и исследование дифференциальных орбит при работе с пучком $^{12}\text{C}^{4+}$ с целью предварительного измерения оптических функций. Разработаны методика эксперимента, требуемое ПО, а также проведена верификация математической модели установки.

Комплексный анализ дифференциальных орбит, полученных в расчетах и измерениях, позволил определить ошибки в полярности подключения ряда дипольных корректоров бустера. В предстоящих сеансах планируется отладка ПО и проведение аналогичных измерений корректоров в вертикальной плоскости и на других установках.

Сравнение измеренных дифференциальных орбит с расчетами в математической модели показывает, что измеренные и расчетные дифференциальные отклики орбит совпадают с высокой точностью ($< 1\%$).

Сравнение измеренной дисперсионной функции с результатами моделирования показывает корреляцию измеренных и расчетных данных также с относительной точностью $< 1\%$ на участках, где $D_x(s) > 1$ м. Расхождение результатов моделирования

и измерений на участках с малой дисперсией ($D_x(s) < 1$ м) может быть обусловлено недостаточной точностью измерений, что планируется скорректировать в дальнейшем.

Расчеты и измерения показывают, что разработанные методы и ПО позволяют с достаточной точностью корректировать орбиту как локально, так и на всей ее длине.

Использование математической модели бустера, верифицированной по результатам проведенных измерений, позволяет определить величины токов отбора и добавки в квадрупольных магнитах бустера для выставления требуемой рабочей точки, что проверено экспериментально при задании проектных значений бетатронных частот. При работе в проектной рабочей точке наблюдалось искажение формы фазового профиля в горизонтальной плоскости на больших амплитудах, что указывает на расположение рабочей точки в окрестности соответствующего резонанса 5-го порядка $5\nu_x = 24$.

Благодарности. Авторы выражают благодарность коллективу Ускорительного отделения ЛФВЭ, а также всем тем, кто поддерживал и помогал с организацией и проведением описанных работ.

Работа выполнена при поддержке гранта для молодых ученых и специалистов ОИЯИ 22-102-09.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бутенко А. В. и др. К вопросу выбора магнитно-оптической структуры «нового нуклотрона» // Письма в ЭЧАЯ. 2023. Т. 20, № 4(249). С. 942.
2. Tuzikov A. et al. Booster Synchrotron at NICA Accelerator Complex // Proc. of the 25th Russ. Part. Accel. Conf. (RuPAC'2016), St. Petersburg, Russia, Nov. 21–25, 2016. Geneva: JACoW Publ., 2017. P. 160–162.
3. Syresin E. et al. Status of Accelerator Complex NICA // Proc. of the 26th Russ. Part. Accel. Conf. (RuPAC'2018), Protvino, Russia, Oct. 1–5, 2018. Geneva: JACoW Publ., 2018. P. 12–16.
4. Kazinova O. et al. Simulation of Closed Orbit Correction for the Nuclotron Booster // Phys. Part. Nucl. Lett. 2018. V. 15, No. 7. P. 854–857.
5. Бутенко А. В. и др. Допуски на погрешности магнитного поля бустера нуклотрона. Сообщ. ОИЯИ Р9-2017-18. Дубна, 2017.
6. Technical Specification (Passport) Object “Booster”: Rep. Dubna, 2018.
7. Jones R., Gasior M., Lefevre T., Schmickler H., Wittenburg K. Introduction to Beam Instrumentation and Diagnostics // Proc. of CAS–CERN Accel. School: Advanced Accel. Phys. Course, Trondheim, Norway, 2013. P. 23–60.
8. Monakhov D. V., Gorbachev E. V., Kirichenko A. E., Romanov S. V., Volkov V. I. Development of Tools for Real-Time Betatron Tune Measurements at the Nuclotron // Phys. Part. Nucl. Lett. 2016. V. 13, No. 5. P. 583–585.
9. Methodical Accelerator Design. 2020.
10. Tango Controls. 2022.
11. Safranek J. Experimental Determination of Storage Ring Optics Using Orbit Response Measurements // Nucl. Instr. Meth. A. 1997. V. 388, No. 1. P. 27–36.
12. Шандов М. М., Костромин С. А. Моделирование динамической апертуры бустерного синхротрона комплекса NICA на основе данных магнитных измерений // Письма в ЭЧАЯ. 2022. Т. 19, № 3(242). С. 178–194.
13. Коломенский А. А., Лебедев А. Н. Теория циклических ускорителей. М.: Физматгиз, 1962.

14. *Dinev D.* Closed Orbit Correction in Synchrotrons // *Phys. Part. Nucl.* 1997. V.28, No.4. P.1013–1060.
15. *Press W.H., Teukolsky S.A., Vetterling W.T., Flannery B.P.* Numerical Recipes in C. 2nd ed. Cambridge, USA: Cambridge Univ. Press, 1992.
16. *Chung Y., Decker G., Evans K.* Closed Orbit Correction Using Singular Value Decomposition of the Response Matrix // *Conf. Proc. C.* 1993. V.930517. P.2263–2265.
17. *Tuzikov A. et al.* Beam Transfer Systems of NICA Facility: From HILAC to Booster // *Proc. of the 27th Russ. Part. Accel. Conf. (RuPAC'2021)*, Alushta, Russia, Sept. 27 – Oct. 1, 2021. P. 10.

Получено 18 ноября 2022 г.