

ИЗМЕРЕНИЯ МАГНИТООПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БУСТЕРА NICA

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

^а Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

^б Государственный университет «Дубна», Дубна, Россия

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

^з Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва

Одной из ключевых установок в инжекционной цепочке тяжелых ионов коллайдера NICA является новый сверхпроводящий бустерный синхротрон (бустер) с максимальной магнитной жесткостью 25 Тл·м. С момента запуска установки в декабре 2020 г. завершено четыре сеанса пусконаладочных работ (ПНР) с пучками различных ионов, два из которых сопровождались проведением экспериментов на установке VM@N. Показаны первые результаты исследований магнитооптических характеристик бустера и параметров пучка с помощью системы коррекции ведущего магнитного поля, а также перспективы таких исследований в экспериментальных и исследовательских работах по настройке инжекционного комплекса и коллайдера NICA.

One of the key facilities in the heavy-ion injection chain of the NICA collider is a new 25 T·m superconducting booster synchrotron (Booster). Since the facility was put into operation in December 2020, four commissioning runs with beams of various ions have been carried out, two of which were accompanied by experiments at the VM@N facility. The first results of the Booster lattice characteristics studies and beam parameters measurements using a guiding magnetic field correction system are described. The prospect of the same studies in the tuning and research at the injection complex and the NICA collider is also shown.

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

ВВЕДЕНИЕ

Новый сверхпроводящий бустер [1, 2] — первый синхротрон в ускорительной цепочке тяжелых ионов комплекса NICA (Nuclotron-based Ion Collider fAcility) [3, 4]. Установка имеет магнитную жесткость 25 Тл·м и периметр 210,96 м, оптические функции суперпериода представлены на рис. 1. Более детальное описание и технические характеристики можно найти в [1]. С момента начала эксплуатации ускорителя прошло четыре сеанса ПНР с различными пучками ионов (от ${}^4\text{He}^{1+}$ до ${}^{124}\text{Xe}^{28+}$), два из которых сопровождались выводом пучка на физический эксперимент.

¹E-mail: Shandov@jinr.ru

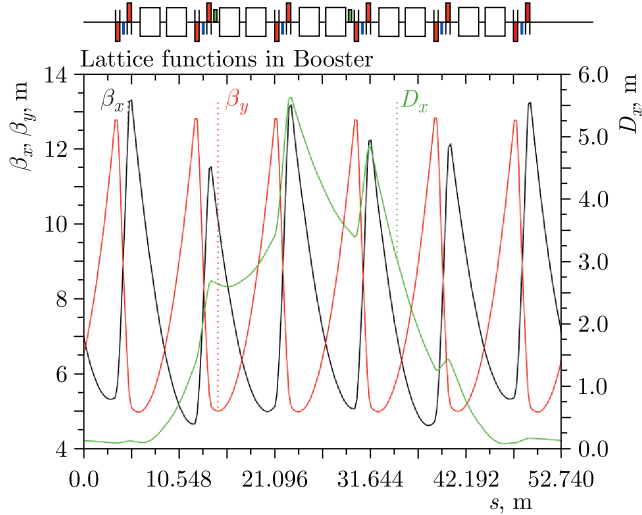


Рис. 1. Оптические функции суперпериода бустера

ИЗМЕРЕНИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ОРБИТ

Основными целями проводимых работ в период сеанса ПНР №4 являлись исследование магнитооптических характеристик и коррекция замкнутой орбиты бустера с учетом полученного ранее опыта [5]. Для проведения исследований выбрана методика исследования дифференциальных орбит. Под дифференциальной орбитой X_i^{diff} в данном случае понимается разница между исходной (или не возмущенной) X_i^{init} и возмущенной X_i^{pert} орбитами:

$$X_i^{diff} = X_i^{pert} - X_i^{init}. \tag{1}$$

Подробное описание этапов реализации методики, разработки требуемого программного обеспечения (ПО) и его отладки можно найти в [5], здесь же приводятся только имеющие принципиальную важность. Автоматическая система управления бустера реализована на базе системы Tango Controls [6]. В рамках данной архитектуры разработано ПО для измерения дифференциальных орбит, позволяющее снимать

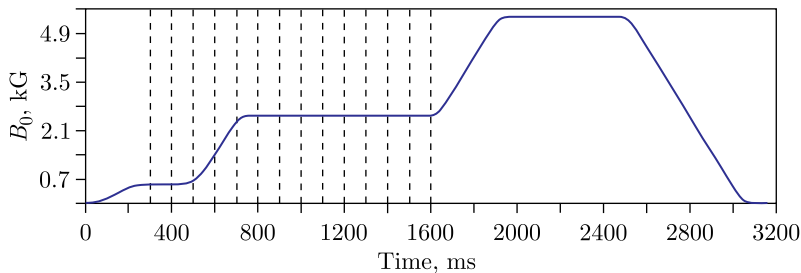


Рис. 2. Цикл магнитного поля бустера с указанием временных интервалов измерения показаний МПП

показания диагностического оборудования (мониторы положения пучка (МПП), датчики интенсивности циркулирующего пучка и т. д.) и управлять корректирующими магнитами (корректорами). Запись показаний с 24 МПП в каждой из плоскостей осуществлялась каждые 100 мс после усреднения за соответствующий временной интервал (рис. 2).

СИГНАЛЫ С МОНИТОРОВ ПОЛОЖЕНИЯ ПУЧКА

Оценка качества измерения замкнутой орбиты (ЗО) проводилась по величине среднеквадратичного отклонения (СКО) показаний МПП на энергии инжекции пучка. Для 9 тыс. последовательных циклов СКО в горизонтальной плоскости составило 0,4–1,0 мм, в вертикальной — $\leq 0,2$ мм (рис. 3).

Основной вклад в повторяемость показаний МПП в горизонтальной плоскости вносит нестабильность ЗО в течение суток, что видно по результатам измерений положения центра масс пучка на входе и выходе участка системы электронного охлаждения за указанный период (рис. 4).

Для анализа сигналов пооборотных измерений с МПП разработан прототип ПО. На вход программы подается бинарный файл с записанными сигналами за интересующий временной интервал (рис. 5), после чего выполняется их обработка и вычисление интересующих магнитооптических характеристик.

Для разработки и отладки ПО в период сеанса записан первый набор требуемых измерений. Ошибки инжекции пучка приводят к возбуждению когерентных

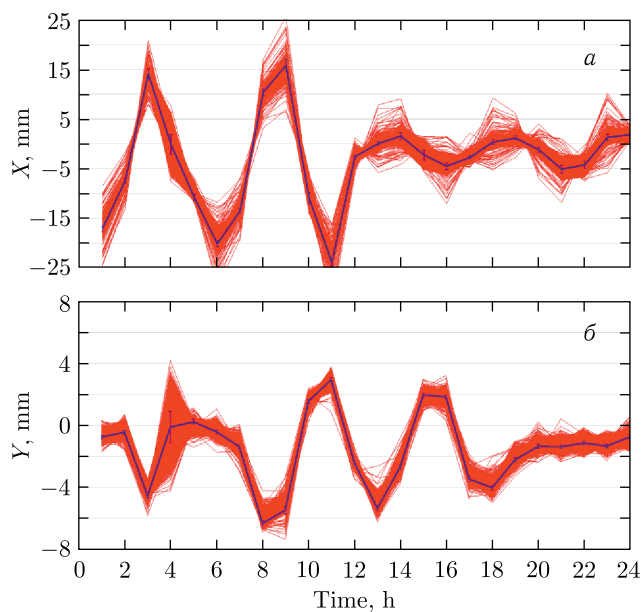


Рис. 3 (цветной в электронной версии). Положение горизонтальной (а) и вертикальной (б) ЗО бустера в течение 9000 циклов ускорения (более 24 ч). Синим показана средняя величина

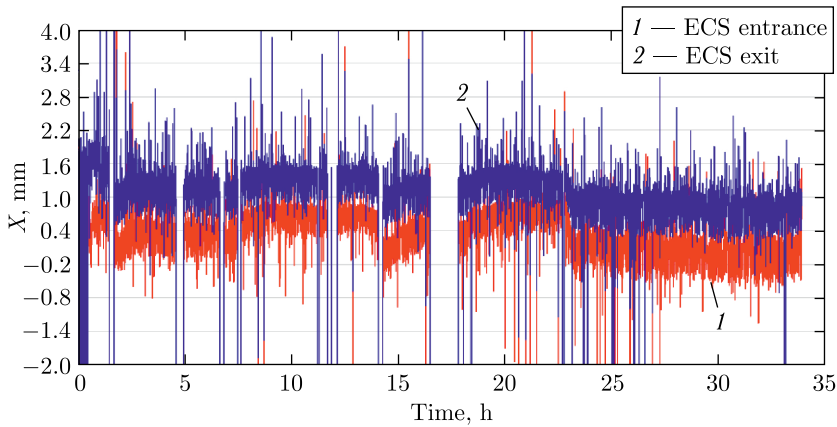


Рис. 4 (цветной в электронной версии). Горизонтальное положение центра масс пучка на входе (красный, 1) и выходе (синий, 2) участка системы электронного охлаждения в течение 9 тыс. циклов ускорения (более 24 ч)

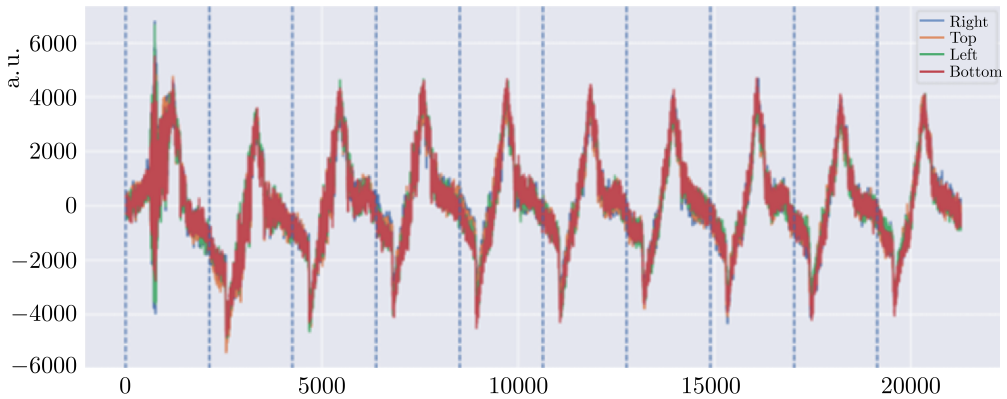


Рис. 5 (цветной в электронной версии). Сигналы с пластин МПП на первых 10 оборотах. Синим (вертикальные штриховые линии) показан период одного оборота

колебаний центра масс пучка. Использование алгоритма анализа несущей частоты (NAFF) [7, 8] позволяет вычислить в таком случае дробные части бетатронных частот (рис. 6, а), которые составили $\nu_{x/y} = 0,11/0,20$ (расчетные значения согласно модели [5, 9]: $\nu_{x/y} = 0,17/0,22$).

Аппроксимация затухающих когерентных колебаний функцией вида $y = A e^{-\beta t} \times \cos(\omega x + \varphi) + b$ (см. рис. 6, б) позволяет также определить дробные части бетатронных частот и натуральную хроматичность, которая составила $\xi_{x/y} = -5,39 / -3,00$ (расчетные значения согласно модели: $\xi_{x/y} = -5,67 / -6,12$). Такое различие измеренной и расчетной величин вертикального хроматизма связано с малой начальной амплитудой колебаний, что затрудняет проведение аппроксимации. В дальнейшем планируется внедрение разработанного ПО непосредственно на пульте управления установкой, развитие алгоритмов и библиотек анализа пооборотных сигналов.

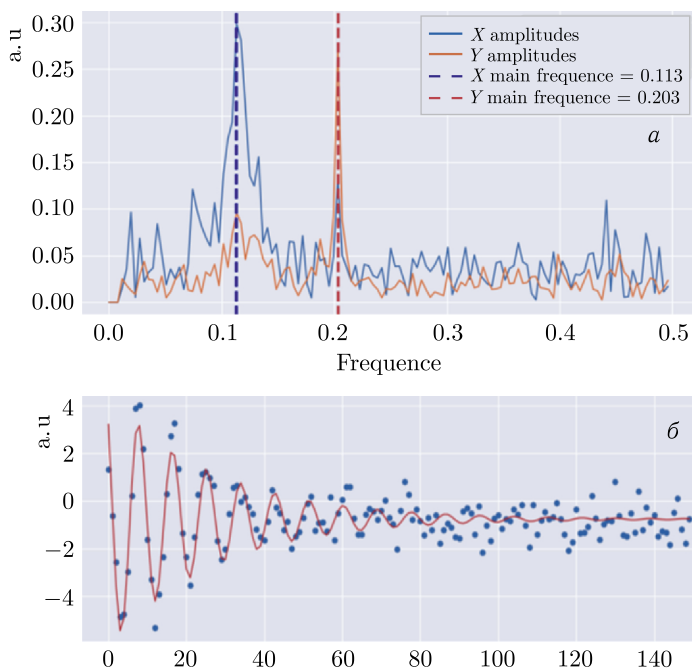


Рис. 6. Примеры спектров дробной части бетатронных частот (а) и затухающих когерентных колебаний центра масс пучка (б), полученные из пооборотных измерений

ИССЛЕДОВАНИЯ С КОРРЕКТИРУЮЩИМИ МАГНИТАМИ

Основным видом проводимых исследований стал анализ дифференциальных орбит при создании возмущения корректорами. Используя набор дифференциальных орбит, полученных при работе с набором корректоров, возможно выполнить проверку полярности подключения источников питания к обмотке магнита. Подробнее методика описана в [5].

Нормируя полученную дифференциальную орбиту (1) на силу используемого корректора (могут использоваться удобные единицы), можно вычислить элементы матрицы отклика орбиты [10]. Согласно разработанному ранее ПО [5] запись требуемого массива экспериментальных данных для вычисления элементов матрицы на бустере составляет 30–40 мин при времени рабочего цикла 3,2 с. Важно отметить, что подавляющую часть указанного времени занимает переключение режимов работы источника (переход из режима ожидания в режим работы «под нагрузкой» и т. п.).

Минимально необходимый для верификации расчетной модели установки и вычисления оптических функций набор дифференциальных орбит должен включать три типа измерений (по одному на каждую фазовую плоскость движения): с возмущением в горизонтальной и вертикальной плоскостях, а также при создании возмущения с помощью настроек ускоряющей системы.

Пример дифференциальных орбит в горизонтальной и вертикальной плоскостях при создании возмущения горизонтальным корректором 2S5H представлен на рис. 7.

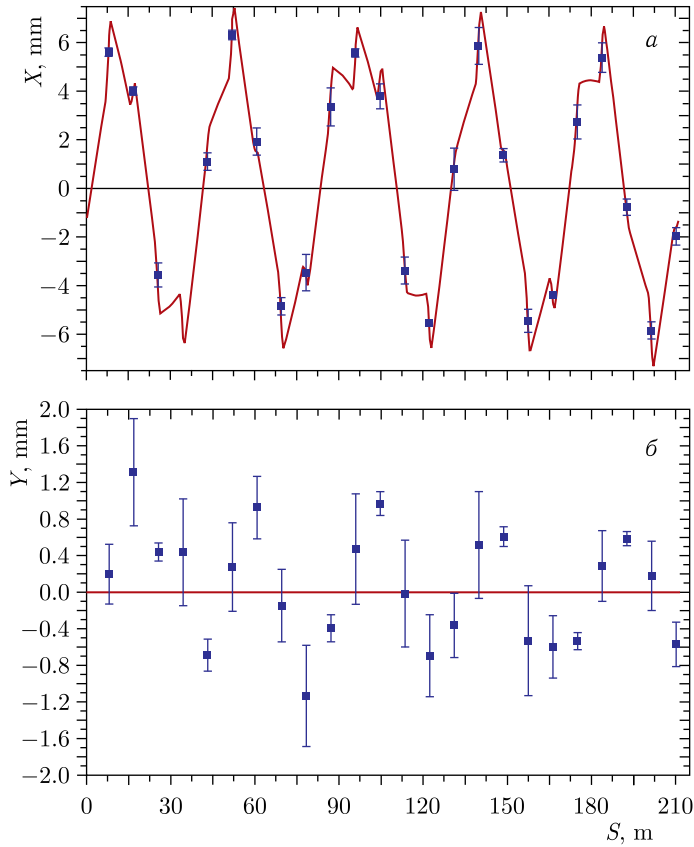


Рис. 7. Примеры дифференциальных орбит в горизонтальной (а) и вертикальной (б) плоскостях при создании возмущения горизонтальным корректором 2S5H. Линия — предсказания расчетной модели, точки — результаты измерений

Данный результат показывает сходимость с предсказаниями расчетной модели с точностью $< 3\%$. Кроме того, наблюдается возбуждение вертикальной орбиты, что указывает на наличие элементов, вызывающих связь поперечных бетатронных движений в магнитооптической структуре, и более комплексный анализ результатов позволит определить набор таких элементов, что планируется сделать в дальнейшем.

Возмущение орбиты движения частицы с импульсом, отличным от равновесного, при движении в ведущем магнитном поле установки характеризуется дисперсионной функцией [8]. Принимая во внимание зависимость импульса частицы от рабочей частоты ускоряющей ВЧ-станции, можно записать выражение для вычисления дисперсионной функции в следующем виде:

$$\Delta X(s) = \eta_x(s) \frac{\Delta p}{p} \Leftrightarrow \eta_x(s) = -\kappa \frac{\Delta X(s)}{\Delta f/f_0}. \quad (2)$$

Здесь $\kappa = \alpha - 1/\gamma^2$; α — коэффициент расширения орбит; γ — лоренц-фактор; $\Delta f/f_0$ — изменение рабочей частоты ускоряющей ВЧ-станции.

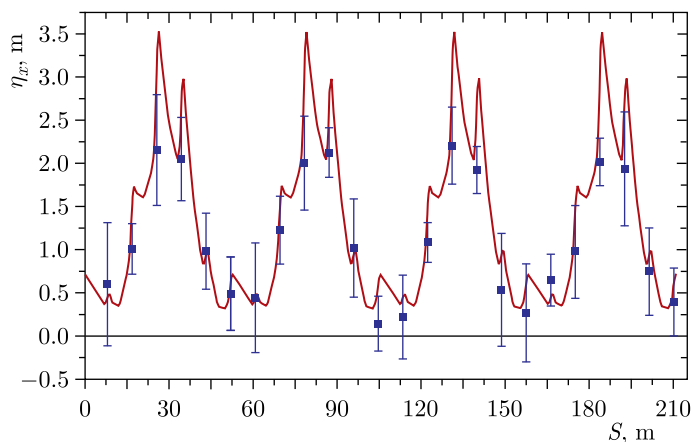


Рис. 8. Измеренная (точки) и расчетная (линия) дисперсионные функции

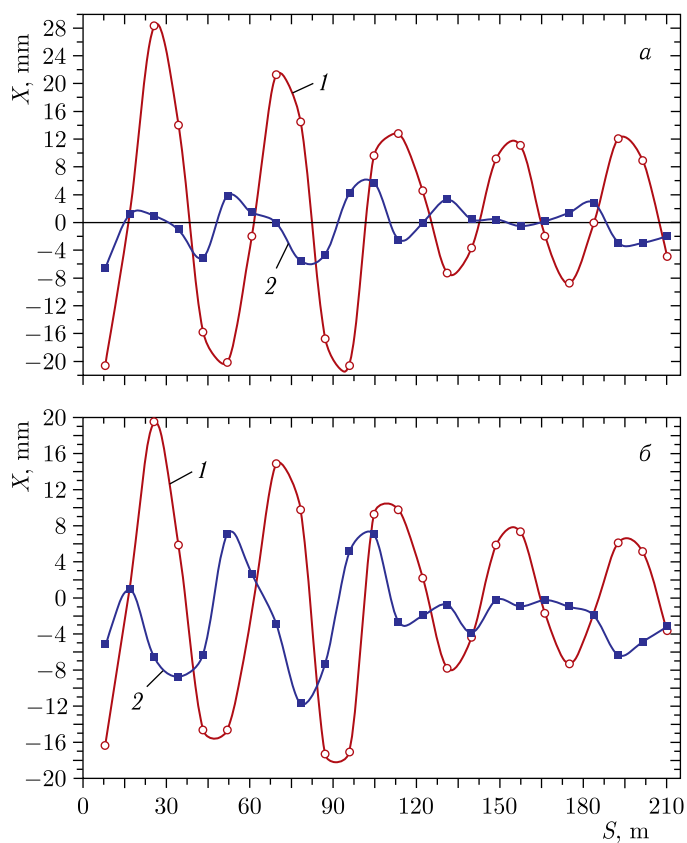


Рис. 9 (цветной в электронной версии). Пример динамической коррекции возмущений ЗО бустера. Показаны возмущенная (красная линия, 1) и скорректированная (синяя, 2) ЗО на энергиях инжекции (а) и вывода (б)

В период четвертого сеанса пусконаладочных работ с пучком удалось повысить точность измерения дисперсионной функции (рис. 8) по сравнению с первым исследованием [5]. Такой результат достигнут, в первую очередь, за счет уменьшения величины помех в сигналах с измерительных пластин МПП. Кроме того, было замечено, что предварительная коррекция возмущений ЗО также повышает точность измерений. Расчетные и измеренные результаты совпадают с точностью $< 3\%$ на участках с $\eta_x(s) > 1$ м. В предстоящих сеансах с пучком планируется продолжить работы по повышению точности измерения дисперсионной функции.

Полученные результаты измерения оптических функций установки методом дифференциальных орбит, коррекция полярности подключения источников питания к обмоткам корректирующих магнитов, измеренная матрица отклика орбиты, а также разработанные ПО и расчетная модель установки позволили, впервые на инжекционном комплексе коллайдера NICA, реализовать динамическую (во всем диапазоне рабочих энергий) коррекцию горизонтальной ЗО в бустере (рис. 9). Удалось скорректировать возмущения ЗО до уровня ± 6 и 12 мм на энергии инжекции и вывода соответственно. Ключевыми факторами, ограничивающими возможности коррекции ЗО, стали неработоспособность трех корректоров в период проведения исследований и ограничения на минимальный рабочий ток $\pm 0,3$ А (для коррекции на энергии инжекции).

Наряду с описанными исследованиями проведены первые эксперименты с аналогичными измерениями на нуклотроне и канале транспортировки пучка из бустера в нуклотрон.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В период четвертого сеанса ПНР бустер инжекционного комплекса коллайдера NICA работал пучками ионов до $^{124}\text{Xe}^{28+}$ и на физический эксперимент. С использованием накопленного опыта [5] в рамках данного сеанса проведены измерения магнитооптических характеристик установки. Сеанс проводился в рабочей точке $\nu_{x/y} = 5,17/5,22$. Проведенные перед сеансом работы с системой диагностики позволили достичь стабильности показаний измерений МПП за 9 тыс. циклов ускорения (более 24 ч) с СКО 0,4–1,0 и $\leq 0,2$ мм в горизонтальной и вертикальной плоскостях соответственно. Ключевым фактором, влияющим на повторяемость показаний МПП в горизонтальной плоскости, является нестабильность положения замкнутой орбиты пучка на протяжении исследуемого периода времени.

Для исследования сигналов непосредственно с измерительных пластин МПП разработано специальное ПО и записаны первые наборы данных для его отладки. Исследования когерентных колебаний на первых оборотах после инжекции пучка показали расхождения с предсказаниями расчетной модели по величине дробной части бетатронных колебаний $\Delta\nu_{x/y} = 0,06/0,02$ и натурального хроматизма $\Delta\xi_{x/y} = 0,28/3,12$. Большое отклонение по величине вертикальной хроматичности обусловлено малой начальной амплитудой когерентных колебаний. В дальнейшем планируется развитие алгоритмов и библиотек анализа экспериментальных данных, а также внедрение ПО непосредственно на пульте управления установкой.

Основной методикой измерения магнитооптических характеристик выбрана методика исследования дифференциальных орбит, позволяющая также выполнять верификацию модели магнитооптической структуры [5, 9]. Для этого требуется набор

измерений при создании, как минимум, трех типов возмущения: в горизонтальной и вертикальной плоскостях и рабочей частоты ускоряющей ВЧ-станции.

Согласно разработанному ранее ПО запись полного набора дифференциальных орбит для возмущений от горизонтальных и вертикальных корректоров составляет 30–40 мин при времени рабочего цикла 3,2 с. Такой набор орбит позволяет вычислять элементы матрицы отклика орбиты и выполнить проверку полярности подключения источников питания к обмоткам корректирующих магнитов.

Измеренные дифференциальные орбиты показывают сходимость с предсказаниями модели с точностью $< 3\%$ (при измерении дисперсионной функции такая точность наблюдается на участках с $\eta_x > 1$ м), а также указывают на наличие магнитных элементов, вызывающих связь поперечных бетатронных движений. В будущем планируется провести более комплексный анализ с целью определения таких элементов. Повышение точности измерения дисперсионной функции получено, кроме прочего, проведением предварительной коррекции ЗО.

Проведенные работы и исследования, а также разработанное ПО позволили, впервые на инжекционном комплексе, получить режим динамической (во всем диапазоне рабочих энергий) коррекции горизонтальной ЗО в бустере. Величина скорректированной ЗО составила ± 6 и 12 мм на энергии инжекции и вывода соответственно. Ключевыми ограничивающими факторами стали неработоспособность трех корректоров в период проведения исследований и ограничения на минимальный рабочий ток $\pm 0,3$ А (для коррекции на энергии инжекции).

Полученные результаты и разработанное ПО значительно расширяют возможности настройки режимов работы ускорителя. Наряду с дальнейшими исследованиями магнитооптических характеристик бустера, планируется реализация аналогичных экспериментов на всех установках и каналах транспортировки пучков ускорительного комплекса, а также развитие ПО как в направлении работы с другими элементами комплекса, так и в направлениях новых алгоритмов и библиотек анализа параметров пучка и повышения скорости обработки данных до времен, соизмеримых с временем рабочего цикла установки. Для более глубокого изучения параметров бустера в предстоящем сеансе планируется ввод в эксплуатацию и проведение исследований с мультипольными корректирующими магнитами («косым» квадрупольным и «прямым» секстипольным).

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сидорин А. О. Техническая спецификация (паспорт) объекта «Комплекс NICA». Дубна, 2018. 71 с.
2. Tuzikov A. V. et al. Booster Synchrotron at NICA Accelerator Complex // Proc. of Russ. Part. Accel. Conf. (RuPAC'16), St. Petersburg, Russia, Nov. 21–25, 2016. Geneva: JACoW Publ., 2017. V. 02. P. 160–162; <http://jacow.org/rupac2016/papers/frcamh05.pdf>.
3. Кекелидзе В. Д., Потребеников Ю. К. Технический проект объекта «Комплекс NICA». Разд. «Техническая спецификация (паспорт) объекта «Комплекс NICA». Дубна, 2018. 90 с.

4. Syresin E. M. et al. NICA Accelerator Complex at JINR // Proc. of the 10th Intern. Part. Accel. Conf. (IPAC'19), Melbourne, Australia, May 19–24, 2019. Geneva: JACoW Publ., 2019. V. 06. P. 452–454; <http://jacow.org/ipac2019/papers/mormp014.pdf>.
5. Шандов М. М. и др. Исследование характеристик магнитной структуры бустера NICA в сеансах пусконаладочных работ с пучком в 2020–2022 гг. // Письма в ЭЧАЯ. 2023. Т. 20, № 4(249). С. 968–982.
6. Tango Controls. 2023. <https://www.tango-controls.org/> (accessed: 22.08.2022).
7. Laskar J. The Chaotic Motion of the Solar System: A Numerical Estimate of the Size of the Chaotic Zones // Icarus. 1990. V. 88. P. 266–291.
8. Коломенский А. А., Лебедев А. Н. Теория циклических ускорителей. М.: Физматлит, 1962.
9. 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.
10. Safranek J. Experimental Determination of Storage Ring Optics Using Orbit Response Measurements // Nucl. Instr. Meth. A. 1997. V. 388, No. 1. P. 27–36.

Получено 15 сентября 2023 г.