

## МОДЕЛИРОВАНИЕ КОРРЕКЦИИ ЗАМКНУТОЙ ОРБИТЫ БУСТЕРА НУКЛОТРОНА

*В. В. Алцыбеев<sup>а</sup>, А. В. Бутенко<sup>б</sup>, В. Н. Емельяненко<sup>б</sup>, О. Казимова<sup>б, 1</sup>,  
В. А. Козынченко<sup>а</sup>, С. А. Костромин<sup>б</sup>, В. А. Михайлов<sup>б</sup>, Д. А. Овсянников<sup>а</sup>,  
А. В. Тузиков<sup>б</sup>, Г. Г. Ходжибагиан<sup>б</sup>*

<sup>а</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

<sup>б</sup> Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Проведена оценка качества коррекции замкнутой орбиты бустера нуклотрона. Приводится распределение максимальных отклонений по обеим осям и результаты численного моделирования методом сингулярного разложения. Дана оценка искажений замкнутой орбиты с худшим качеством коррекции.

The estimation of correction quality for the booster closed orbit has been carried out. Distribution of the maximum orbit distortion in both directions and the results of numerical simulation by singular value decomposition method are given. The estimation of the orbit distortion with the worst correction quality is presented.

PACS: 02.60.Cb; 29.20.Lq

### ВВЕДЕНИЕ

Магнитная структура бустера нуклотрона состоит из четырех суперпериодов типа DFO, каждый из которых включает 10 дипольных магнитов, 6 фокусирующих и 6 дефокусирующих линз, мультипольные корректоры для компенсации погрешностей основного поля (диполи, квадруполь), нелинейностей магнитного поля и коррекции хроматичности (секступоль). Максимальное магнитное поле в дипольных магнитах составляет 1,8 Тл [1]. Основные характеристики магнитной структуры бустера даны в табл. 1.

Система коррекции орбиты бустера состоит из 24 сверхпроводящих дипольных и 8 мультипольных корректоров [2]. Каждый дипольный корректор содержит две обмотки (прямой и косой диполь) для коррекции горизонтальной и вертикальной замкнутой орбиты, а мультипольный корректор состоит из четырех обмоток (прямой и косой квадруполь и секступоль). Корректоры системы коррекции замкнутой орбиты расположены равномерно по кольцу бустера и должны обеспечить компенсацию искажений орбиты до приемлемых величин при использовании различных алгоритмов коррекции (SVD, MICADO, LSQ) в статическом или динамическом режимах. Схема расположения структурных элементов бустера с условными обозначениями представлена на рис. 1.

---

<sup>1</sup>E-mail: kazimova.olga@gmail.com

Таблица 1. Основные параметры магнитной структуры бустера

Ионы	$^{197}\text{Au}^{31+}$
Энергия инжекции, МэВ/нуклон	3,2
Максимальная энергия, МэВ/нуклон	578
Магнитная жесткость, Тл · м	
при инжекции	1,64
максимальная	25,2
Частоты бетатронных колебаний $Q_x/Q_z$	4,8/4,85
Хроматичность	
$\Delta Q_x/(\Delta p/p)$	-5,1
$\Delta Q_y/(\Delta p/p)$	-5,5
Акцептанс, $\pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$	
горизонтальный	150
вертикальный	55
Эмиттанс пучка, $\varepsilon_x/\varepsilon_z$ , $\pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$	
при инжекции	15/15
в конце ускорения	3/1,5
Период обращения, мкс	
при инжекции	8,51
в конце ускорения	0,89

## ОЦЕНКА КАЧЕСТВА КОРРЕКЦИИ В БУСТЕРНОМ СИНХРОТРОНЕ

Моделирование движения пучка проводилось с помощью программы MAD-X [3]. Для оценки эффективности системы коррекции была использована программа DAISI [4]. Целью вычислительного эксперимента являлось сравнение в обеих поперечных плоскостях максимального отклонения замкнутой орбиты от идеальной оси в невозмущенной структуре и максимального отклонения орбиты в структуре с искажениями магнитного поля и погрешностями юстировки магнитных элементов. Предельные значения погрешностей для различных значений указаны в табл. 2.

Таблица 2. Погрешности дипольной компоненты магнитного поля и юстировки

Изменяемое значение	Относительная погрешность
Дипольная компонента магнитного поля	0,001
Отклонение по оси $O_x$ , м	0,0001
Отклонение по оси $O_y$ , м	0,0001
Поворот относительно продольной оси, рад	0,001

Было проведено 30 000 циклов. Каждый цикл проводился в соответствии со следующим алгоритмом.

1. Погрешности дипольной компоненты магнитного поля и ошибки юстировки для каждого магнитного элемента бустера задаются по закону распределения Гаусса.

2. Вычисляется максимальное отклонение в обеих поперечных плоскостях орбиты возмущенной структуры.

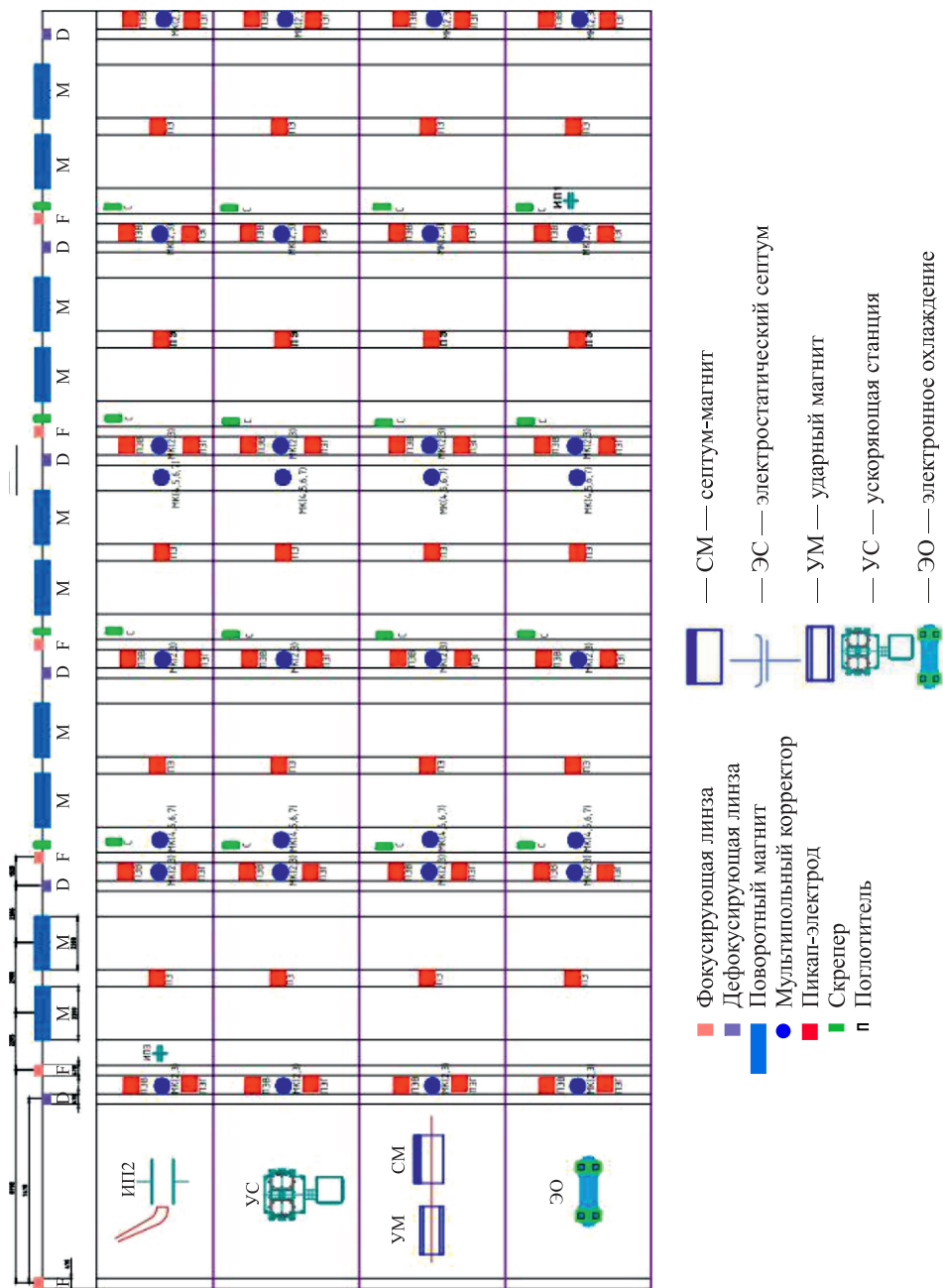


Рис. 1. Структурная схема бустера

3. С использованием метода сингулярного разложения (SVD) проводится коррекция орбиты в возмущенной структуре.

4. Для скорректированной орбиты вычисляется максимальное отклонение от оси структуры в обеих поперечных плоскостях.

5. Определяется качество коррекции в возмущенной структуре как частное от деления максимального отклонения орбиты после коррекции на максимальное отклонение орбиты до коррекции в той же возмущенной структуре.

На рис. 2 представлено распределение по обеим осям максимальных отклонений до и после коррекции.

Как видно из приведенных графиков, среднее значение максимального отклонения по  $O_x$  до коррекции составляет 0,019, после коррекции — 0,002; по  $O_y$  до коррекции — 0,012, после коррекции — 0,0008. Распределение качества коррекции по обеим осям представлено на рис. 3.

Качество коррекции орбиты в горизонтальной и вертикальной плоскостях составило 9,5 и 15,5 соответственно. Также был рассмотрен случай, в котором между дипольными магнитами отсутствуют пикап-электроды. В таком варианте качество коррекции

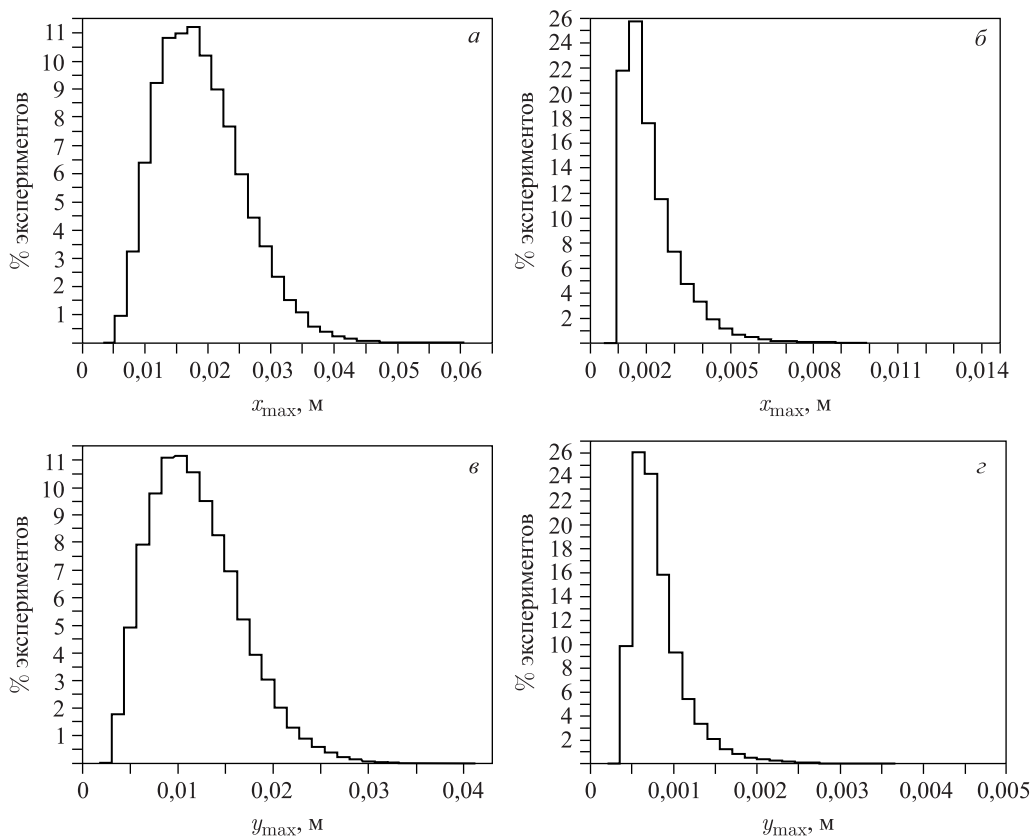


Рис. 2. Распределение максимальных отклонений: а) по  $O_x$  до коррекции; б) по  $O_x$  после коррекции; в) по  $O_y$  до коррекции; г) по  $O_y$  после коррекции

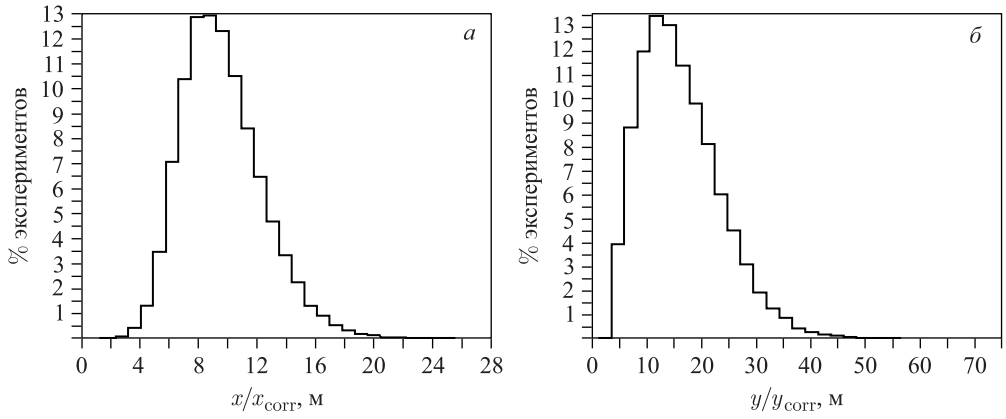


Рис. 3. Распределение качества коррекции: а) по оси  $x$ ; б) по оси  $y$

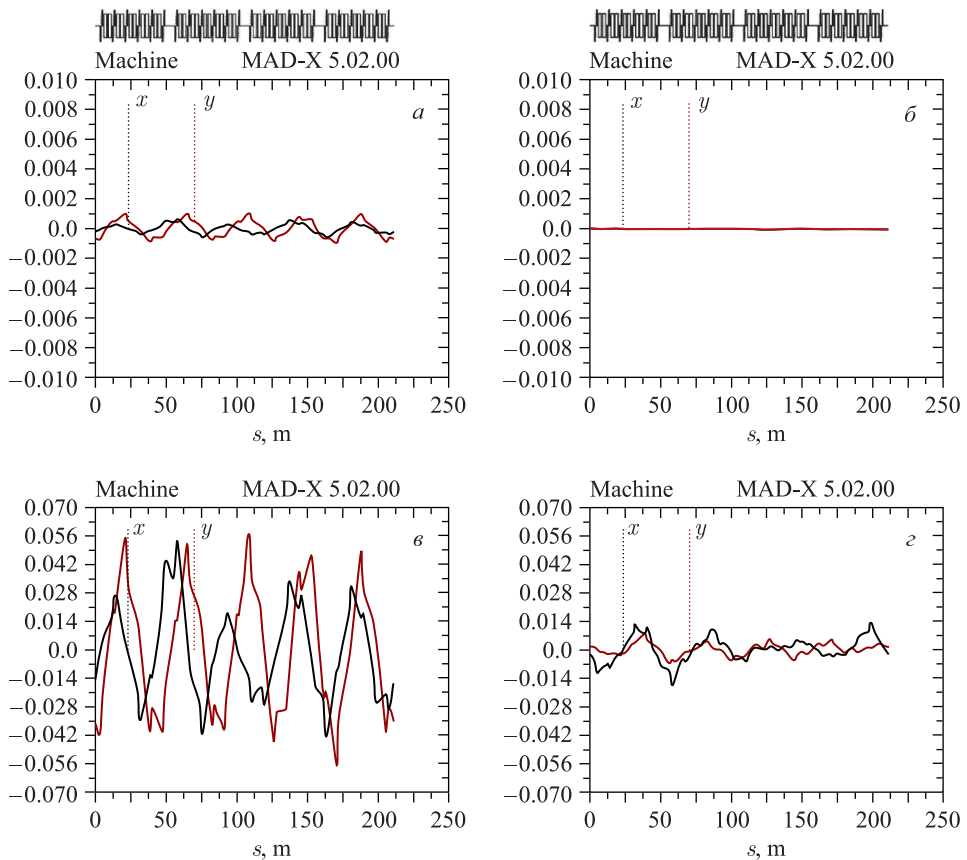


Рис. 4. Искажения орбиты: а) малых амплитуд до коррекции; б) малых амплитуд после коррекции; в) больших амплитуд до коррекции; г) больших амплитуд после коррекции

замкнутой орбиты составило 8,5 и 12,5 для  $O_x$  и  $O_y$  соответственно. Были проведены дополнительные оценки искажений замкнутой орбиты при 100 000 циклов. Результаты показали, что при увеличении числа испытаний качество коррекции увеличилось на 0,1 для каждой оси.

Большие отклонения от идеальной замкнутой орбиты корректируются хуже, чем малые отклонения (рис. 4). Величины погрешностей дипольной компоненты магнитного поля подбирались вручную для достижения таких амплитуд.

Для набора статистики было проведено 100 000 циклов с большими амплитудами. В данном случае минимальное качество коррекции составило 1,41 и 1,56 для  $O_x$  и  $O_y$  соответственно.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведен анализ качества коррекции замкнутой орбиты бустера нуклотрона проекта NICA. Моделирование данного процесса показало, что при включении всех 24 мультипольных корректоров по кольцу коэффициент качества коррекции составляет 9,5 и 15,5 для  $O_x$  и  $O_y$  соответственно. При отсутствии датчиков положения пучка между дипольными магнитами качество коррекции на 10 % хуже.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Технический проект ускорительного комплекса NICA. Дубна, 2015. Т.2. С. 11–12.
2. *Butenko A. et al.* Progress in NICA Booster Design // Proc. of RUPAC2012. P. 310–312.
3. MAD — Methodical Accelerator Design. CERN-BE/ABP Accelerator Beam Physics Group. <http://madx.web.cern.ch/madx/>.
4. DAISI. Design of Accelerators, Optimizations and Simulations. <https://daisi.sourceforge.io/>.