

## КОРРЕКЦИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ БУСТЕРА НУКЛОТРОНА

*В. Ангелов<sup>а</sup>, О. Казимова<sup>б,1</sup>, В. А. Михайлов<sup>б</sup>*

<sup>а</sup> Институт ядерных исследований и ядерной энергетики Болгарской академии наук, София

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

Изучалась нелинейная динамика пучков ионов  $^{197}\text{Au}^{31+}$  в бустере нуклотрона с помощью программы MAD-X. Приводится численный расчет динамической апертуры DFO-магнитной структуры бустера с учетом резонансов второго и третьего порядка. Проведен анализ разброса частот бетатронных колебаний. В данной работе показано, что использование мультипольных корректоров позволит получить пучки с требуемыми параметрами.

Nonlinear dynamics of the  $^{197}\text{Au}^{31+}$  ion beam in the booster was studied with the MAD-X program. Numerical computation of dynamic aperture for the booster's DFO-magnetic lattice is presented. Resonances of second and third order were taken into account. Analysis of the betatron oscillation frequency spread was carried out. This paper shows that the use of the multipole correctors allows one to get the beams with required parameters.

PACS: 02.70.-c; 07.55.Db; 29.20.D

### ВВЕДЕНИЕ

Бустер — стандартный элемент в схемах ускорительных комплексов тяжелых ионов на высокие энергии. В случае ускорительного комплекса NICA [1] включение его в схему позволит:

— ускорять пучки  $\text{Au}^{31+}$  до энергии 600 МэВ/нуклон, обеспечивающей необходимую обдирку ионов золота;

— снизить требования к давлению остаточного газа в вакуумной камере нуклотрона;

— увеличить фазовую плотность пучка за счет электронного охлаждения.

Ниже рассмотрено влияние измеренных погрешностей магнитного поля бустера [2, 3] на динамику частиц. Результаты моделирования коррекции орбиты приведены в работе [4].

### 1. МАГНИТНАЯ СТРУКТУРА БУСТЕРА

Выбранная магнитная структура состоит из четырех суперпериодов, в каждый из которых входят 3 регулярных периода и один период, не содержащий дипольных магнитов. Регулярный период включает в себя фокусирующую и дефокусирующую

---

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

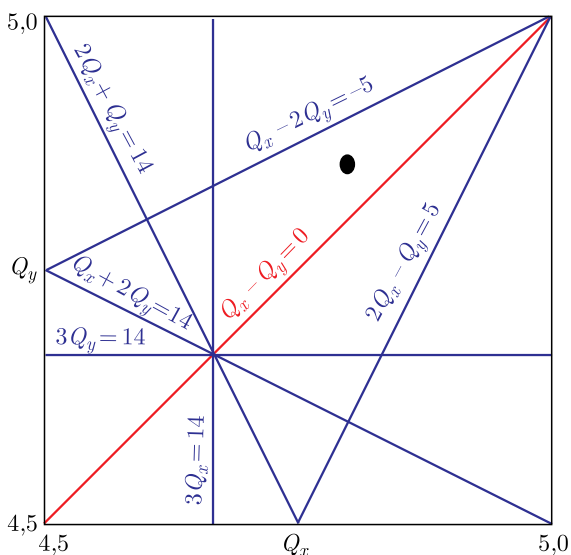


Рис. 1. Диаграмма резонансов в окрестности рабочей точки

квадрупольные линзы, 2 дипольных магнита и 4 малых свободных промежутка между квадрупольными линзами F и D, предназначенных для размещения дипольных корректоров. 8 мультипольных корректоров располагаются в каждом суперпериоде в промежутках между квадрупольными и дипольными магнитами: 4 — рядом с линзами F и 4 — рядом с линзами D.

Диаграмма частот бетатронных колебаний приведена на рис. 1. Очевидно, что инжекцию и ускорение ионов желательно осуществлять, работая в области частот бетатронных колебаний  $Q_x = 4,8$  и  $Q_y = 4,85$ .

## 2. КОРРЕКЦИЯ ЧАСТОТ БЕТАТРОННЫХ КОЛЕБАНИЙ

Коррекция частот бетатронных колебаний включает в себя задание начальной частоты и поддержку ее в процессе ускорения, а также коррекцию хроматичности. В первом случае это действие осуществляется с помощью задания высокой точности управления токами ( $\pm 2 \cdot 10^{-4}$ ) в структурных квадрупольных линзах. Во втором случае мы решили отказаться от секступольной коррекции хроматичности, равной  $-5,5$ , так как близость резонансов третьего порядка приводит к существенному увеличению амплитуды биений бетатронных колебаний.

Во втором приближении метода Крылова–Боголюбова появляется зависимость частоты бетатронных колебаний от амплитуды секступольной нелинейности [4] (рис. 2). В нашем случае вклад этой нелинейности в структурных дипольных магнитах оказывается несущественным.

С учетом импульсного разброса и величины хроматичности  $\Delta Q_{x,y}/(\Delta p/p) = -6,8$  суммарный разброс частот в обеих плоскостях не будет превышать  $\pm 10^{-2}$ .

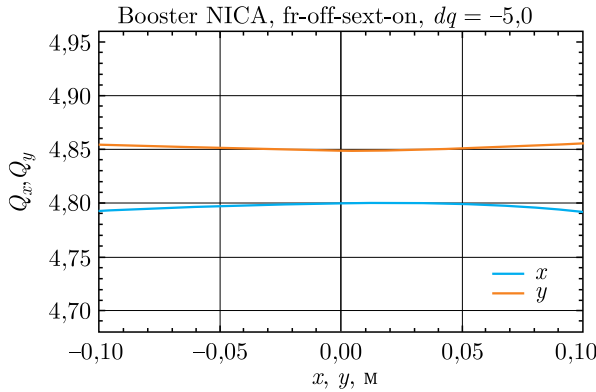


Рис. 2. Влияние секступольной нелинейности на разброс частот бетатронных колебаний

### 3. КОРРЕКЦИЯ РЕЗОНАНСОВ ВТОРОГО ПОРЯДКА

Для коррекции параметрических резонансов в бустере нуклотрона предусмотрено подключение дополнительных источников тока к структурным квадрупольным линзам. Найдем взаимное положение этих квадрупольных линз из условия ортогональности векторов коррекции резонансов  $2Q_{x,y} = 10$  и  $2Q_{x,y} = 9$  в каждой из плоскостей колебаний:

$$10\Theta = \pi/2 + \pi k, \quad 9\Theta = \pi/2 + \pi k, \quad (1)$$

откуда азимутальное расстояние между соседними корректорами равно

$$\Theta = \frac{\pi(2k + 1)}{20}, \quad \Theta = \frac{\pi(2k + 1)}{18}. \quad (2)$$

Приравняем эти расстояния к положению фокусирующих и дефокусирующих структурных квадрупольных линз  $\Theta = 2\pi n/24$ . Откуда номера периодов  $n$ , в которых располагаются вторые корректирующие квадрупольные линзы для 10-й и 9-й гармоник поля коррекции, соответственно равны:  $n = 3(2k + 1)/5$ ,  $n = 2(2k + 1)/3$ .

Для независимой коррекции резонансов необходимо запитать диаметрально противоположные линзы тем же током для 10-й гармоники и противоположным — для 9-й. Возможные положения корректирующих линз приведены в таблице.

**Возможные положения квадрупольных магнитов бустера**

$2Q_{x,y} = 10$		$2Q_{x,y} = 9$	
$k$	$n$	$k$	$n$
2	3	1	2
7	9	4	6
12	15	7	10
17	21	10	14
22	27	13	18

Таким образом, для коррекции четырех параметрических резонансов может потребоваться 16 квадрупольных линз и 8 источников питания. Необходимое количество корректоров будет определено в процессе настройки ускорителя. В качестве примера приведем фазовые диаграммы пучка вблизи параметрического резонанса в вертикальной плоскости (рис. 3–5).

Резонанс связи  $Q_x - Q_y = 0$  на первом этапе настройки ускорителя корректировать не предполагается из-за примерного равенства горизонтального и вертикального эмиттансов циркулирующего пучка при однооборотной инжекции.

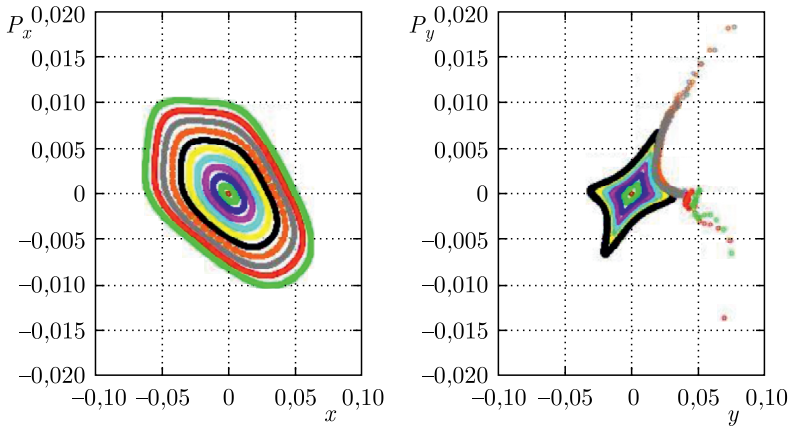


Рис. 3. Фазовый портрет пучка в точке  $Q_x = 4,8$  и  $Q_y = 5$

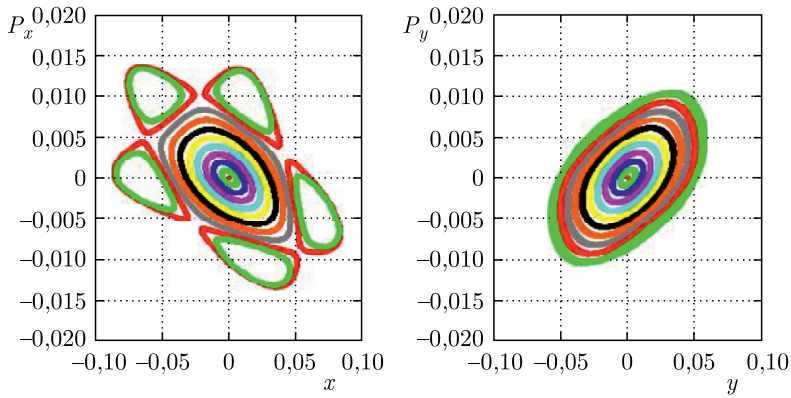


Рис. 4. Фазовые портреты пучка вблизи резонанса связи  $Q_x - 2Q_y = -5$

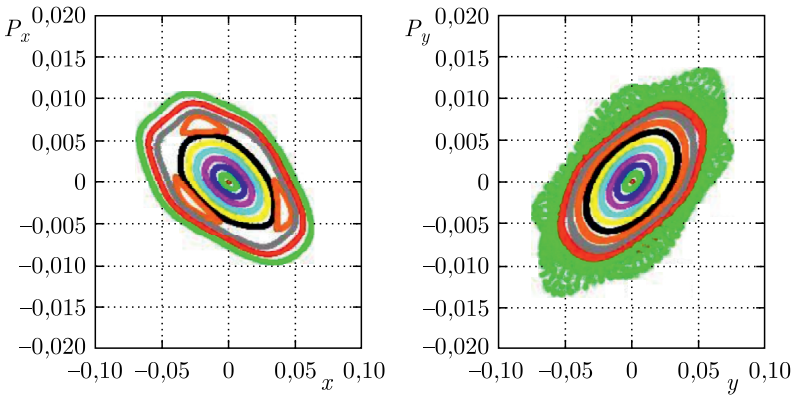


Рис. 5. Фазовые портреты пучка вблизи резонанса связи  $3Q_x = 14$

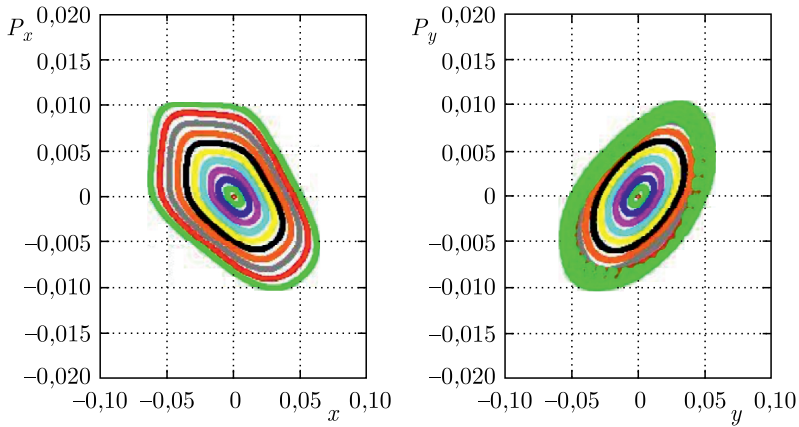


Рис. 6. Фазовая картина пучка при  $Q_x = 4,8$  и  $Q_y = 4,85$

#### 4. КОРРЕКЦИЯ РЕЗОНАНСОВ ТРЕТЬЕГО ПОРЯДКА

В соответствии с рис. 1 наиболее близкими к рабочей частоте бетатронных колебаний являются резонансы третьего порядка  $Q_x - 2Q_y = -5$ ;  $3Q_x = 14$ , возбуждаемые 5-й и 14-й гармониками секступольной нелинейности соответственно. Ближайший к рабочей точке резонанс связи может быть скорректирован с помощью секступольных обмоток мультипольных корректоров.

Сложнее осуществлять коррекцию простого резонанса  $3Q_x = 14$ . Для этого недостаточно имеющихся секступольных корректоров, которые создают цепочку коллинеарных векторов по азимуту ускорителя.

Интегральная фазовая картина пучка в ускорителе в окрестности рабочей точки представлена на рис. 6. Отсутствие больших амплитуд биений бетатронных колебаний говорит о хорошем качестве магнитного поля.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Trubnikov G. et al.* The NICA Project at JINR // Proc. of IPAC 2016, Busan, Korea, 2016.
2. *Borisov V. et al.* Magnetic Measurements of the NICA Booster Superferric Magnets // IEEE Trans. Appl. Superconduct. 2018. P. 1-1. 10.1109/TASC.2018.2799857.
3. *Shemchuk A. V. et al.* Serial Magnetic Measurements of Quadrupole Magnets of the NICA Booster Synchrotron // Письма в ЭЧАЯ. 2018. Т. 15, № 7(219). С. 845.
4. *Алцыбеев В. В. и др.* Моделирование коррекции замкнутой орбиты бустера нуклотрона // Там же. С. 821–826.