

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ АПЕРТУРЫ СИНХРОТРОНА С ЭЛЕКТРОННЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

Д. М. Попов^{a, 1}, В. А. Востриков^{a, 2}, М. Ф. Блинov^a

^a Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, 630090, Россия

Секступольные линзы, применяемые для коррекции хроматизма, могут возбуждать нелинейные резонансы, ограничивающие динамическую апертуру. Также необходимо учитывать влияние бетатронной связи, возбуждаемой соленоидом секции охлаждения. Представлены результаты исследования динамической апертуры бустерного синхротрона, разрабатываемого в ИЯФ СО РАН. Определены оптимальные рабочие точки для различных режимов работы ускорителя. Выполнен частотный анализ для исследования регулярности траекторий в апертуре ускорителя.

Sextupoles applied to chromaticity correction can excite nonlinear resonances and limitate the dynamic aperture. This paper presents the simulation of beam dynamics in the synchrotron developed by BINP. The electron cooling solenoid excites the significant betatron coupling which is taken into account in the simulation. The optimal tunes for different regimes are defined, and FMA is performed to investigate the regularity of trajectories in the aperture.

PACS: 29.20.Lq; 29.27.Bd

ВВЕДЕНИЕ

В ИЯФ им. Г. И. Будкера СО РАН разрабатывается ионный ускорительный комплекс [1], работающий с широким спектром ускоряемых ионов, для технологических целей. Важной частью комплекса является бустерный синхротрон с электронным охлаждением.

В представленной работе рассматривается поперечная динамика пучка в бустерном синхротроне. Основными факторами, влияющими на динамику пучка в бустере, являются линейная связь бетатронных колебаний, вызванная соленоидом секции охлаждения, хроматические секступольные линзы, нелинейности основных магнитных элементов, вихревые токи в стенках вакуумной камеры, индуцируемые при ускорении, эффекты пространственного заряда пучка.

¹E-mail: d.m.popov@inp.nsk.su

²E-mail: v.a.vostrikov@inp.nsk.su

БУСТЕРНЫЙ СИНХРОТРОН

Бустерный синхротрон состоит из пары ахроматических арок и двух бездисперсионных промежутков, один из которых предназначен для установки элементов впуска-выпуска и ВЧ-резонатора, а другой используется для установки электронного охлаждения. Общий вид бустерного синхротрона представлен на рис. 1, *а*. Основные параметры бустерного синхротрона приведены в таблице.

В бустере предусматриваются два режима выпуска: медленный на резонанс $3\nu_x$ и однооборотный на максимальной энергии. Для обеспечения высокой однородности пучка при медленном выпуске применяются амплитудная раскачка и пара секступольных линз, возбуждающих резонанс $3\nu_x$ [2].

Одним из важнейших элементов бустера является установка электронного охлаждения (СЭО-350), позволяющая накапливать и охлаждать интенсивные ионные пучки. Общий вид установки электронного охлаждения, разработанной в ИЯФ СО РАН, представлен на рис. 1, *б*.

Наиболее эффективное охлаждение ионного пучка достигается в сильном однородном продольном магнитном поле, которое создается соленоидом секции охлажде-

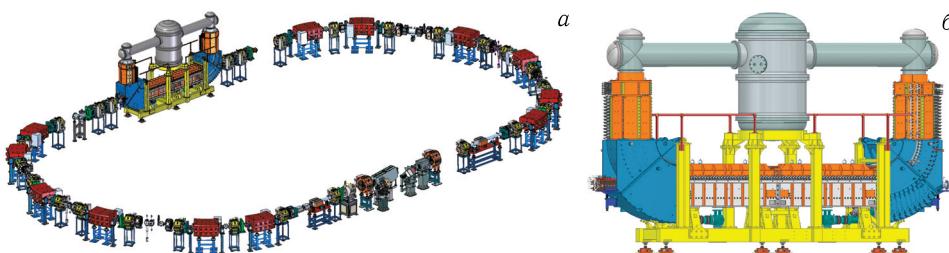


Рис. 1. *а*) Общий вид бустерного синхротрона; *б*) общий вид установки электронного охлаждения

Основные параметры бустерного синхротрона

| Параметр | Значение | |
|--|---------------|-------------------|
| Тип ускоряемых частиц | p | Bi^{41+} |
| Энергия инжекции, МэВ/нуклон | 7,5 | 4 |
| Энергия выпуска, МэВ/нуклон | 7,5–700 | 4–36 |
| Частота обращения, МГц | 0,4–2,612 | 0,294–0,861 |
| Дипольное магнитное поле, кГс | 1,42–16 | |
| Максимальная частота повторения цикла, Гц | 1 | |
| Периметр кольца, м | 94,1 | |
| Максимальное значение β_x/β_y , м | 15,7/24,6 | |
| Максимальная дисперсия, м | 4,25 | |
| Бетатронные частоты: ν_x, ν_y | 3,3183, 3,115 | |
| Коэффициент уплотнения орбит α | 0,1153 | |
| Критическая энергия γ_c | 2,94 | |
| Натуральный хроматизм: ξ_x, ξ_y | -2,81, -5,75 | |
| Акцептанс: A_x, A_y, π см · мрад | 24,9, 7 | |
| Энергетический разброс $\delta = \Delta p/p, \%$ | 0,6 | |

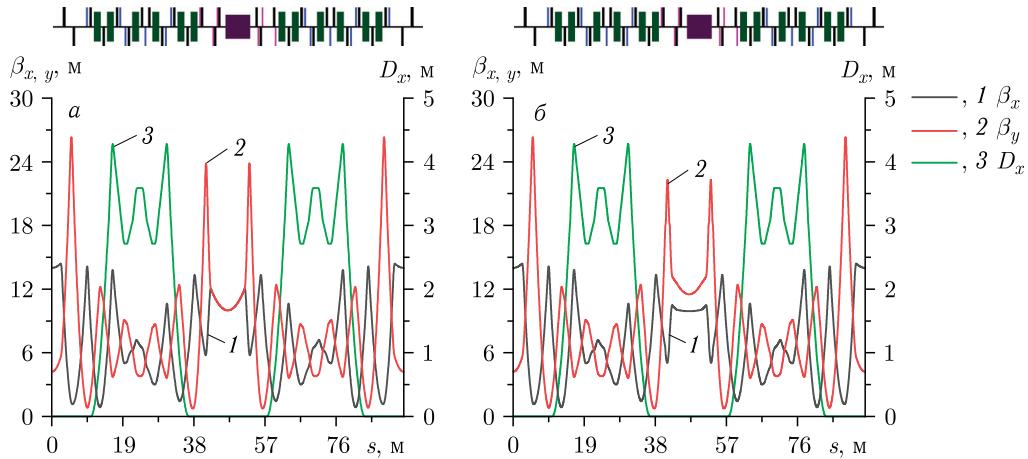


Рис. 2. Оптические функции бустерного синхротрона: *a*) с выключенным соленоидом охлаждения; *б*) с включенным соленоидом

ния [3]. Продольное магнитное поле возбуждает связь бетатронных колебаний, для компенсации которой применяется пара скью-квадрупольных триплетов. Задача о локализации поперечной бетатронной связи в бездисперсионном промежутке, содержащем установку электронного охлаждения, рассмотрена в работе [4].

Оптические функции бустерного синхротрона с выключенным соленоидом представлены на рис. 2, *a*. Для включенного соленоида с локализованной связью оптические функции в параметризации Эдвардса–Тенга представлены на рис. 2, *б*.

ДИНАМИКА ПУЧКА В БУСТЕРНОМ СИНХРОТРОНЕ

В базовой конфигурации бустера секступольные линзы предполагалось разделить на два семейства. Выбор рабочей точки медленного выпуска $\nu_x = 3,3183$, $\nu_y = 3,115$, оптические функции для которой представлены на рис. 2, обусловлен следующими факторами: отстройка от резонанса $3\nu_x$ определяется приемлемой силой резонансных секступольных линз и составляет 0,015; необходимо выбрать рабочую точку ниже резонансов $3\nu_x$, $2\nu_x + 2\nu_y$, на максимально возможном удалении от них; интенсивность ионного пучка ограничивается кулоновским сдвигом частоты при приближении к целочисленному резонансу сверху.

В рабочей точке медленного выпуска была рассчитана динамическая апертура, представленная на рис. 3, которая оказалась меньше геометрической. Для исследования структуры на наличие опасных резонансов было предложено использовать метод сканирования структуры по частотам. В процессе сканирования производилась локализация бетатронной связи, а также компенсация хроматизма. При этом бетатронные функции в центрах длинных промежутков оставались фиксированными, а арки сохраняли ахроматичность. Изменение рабочей точки происходило в основном за счет перестройки оптики в арках. Результаты сканирования для бустера в базовой конфигурации представлены на рис. 4.

Для оптимизации динамической апертуры структура бустера изменена следующим образом: симметризованы горизонтальные бетатронные функции в арках, организован

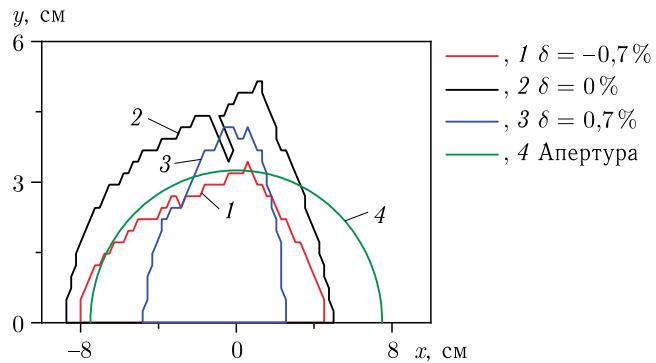


Рис. 3. Динамическая апертура бустера в базовой конфигурации с двумя семействами секступольных линз

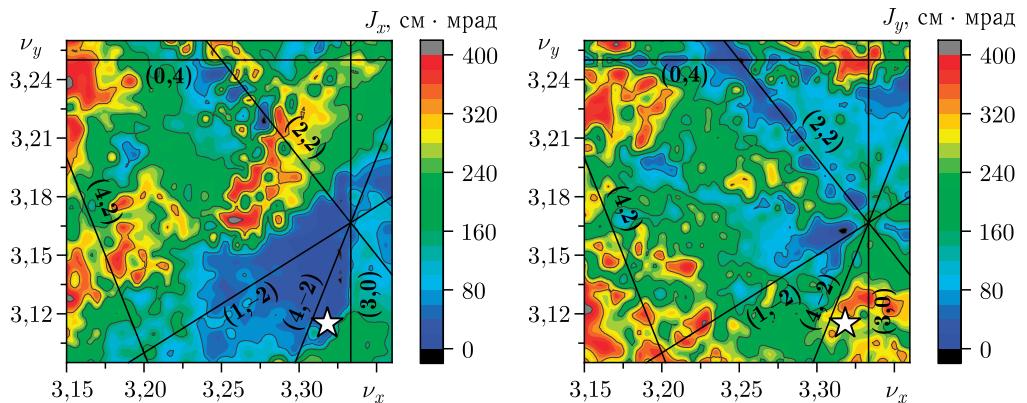


Рис. 4. Действие, ограничивающее область устойчивости для бустера в базовой конфигурации, в зависимости от частот. Звездочкой отмечена рабочая точка $\nu_x = 3,3183$, $\nu_y = 3,115$

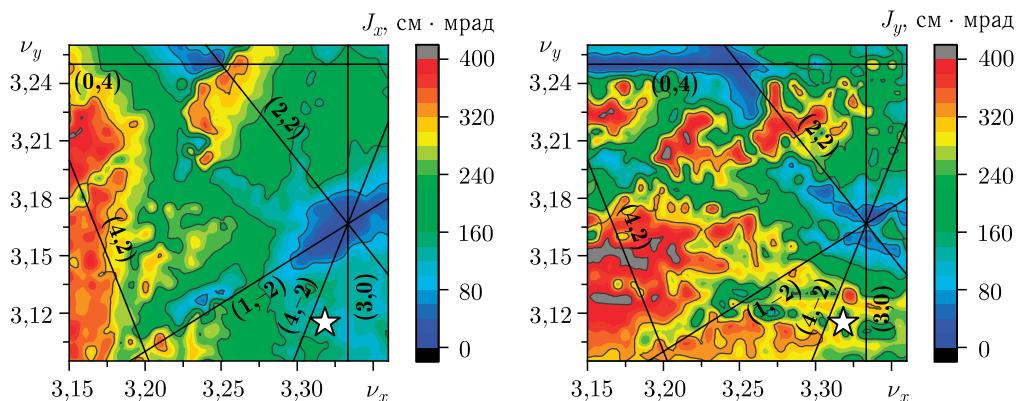


Рис. 5. Действие, ограничивающее область устойчивости для модифицированной структуры, в зависимости от рабочей точки. Звездочкой отмечена рабочая точка $\nu_x = 3,3183$, $\nu_y = 3,115$

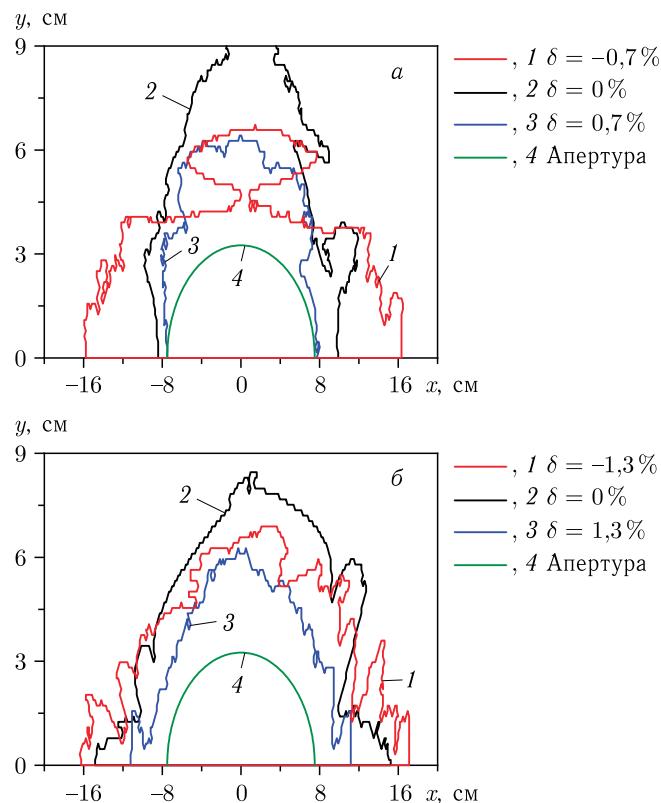


Рис. 6. Динамическая апертура: *a*) в рабочей точке для медленного выпуска; *б*) в рабочей точке для инжекции

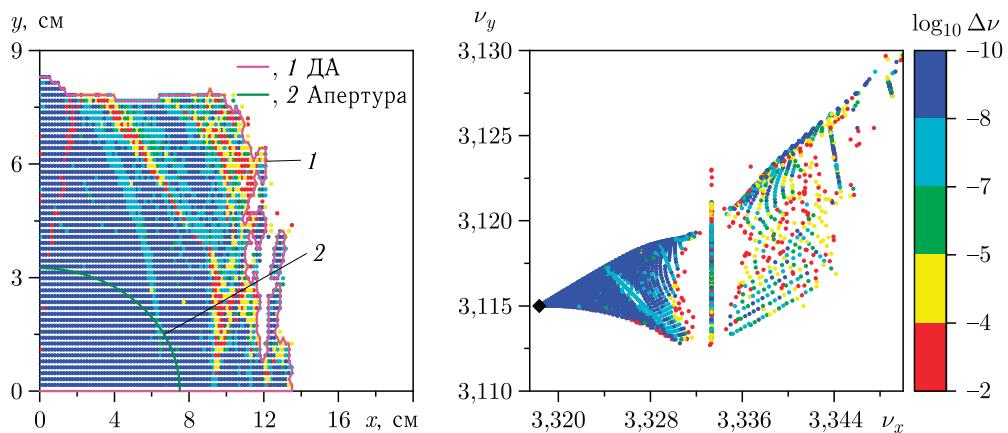


Рис. 7. Частотный анализ динамической апертуры для медленного выпуска с $\delta = 0$ в модифицированной структуре. Ромбом отмечена рабочая точка

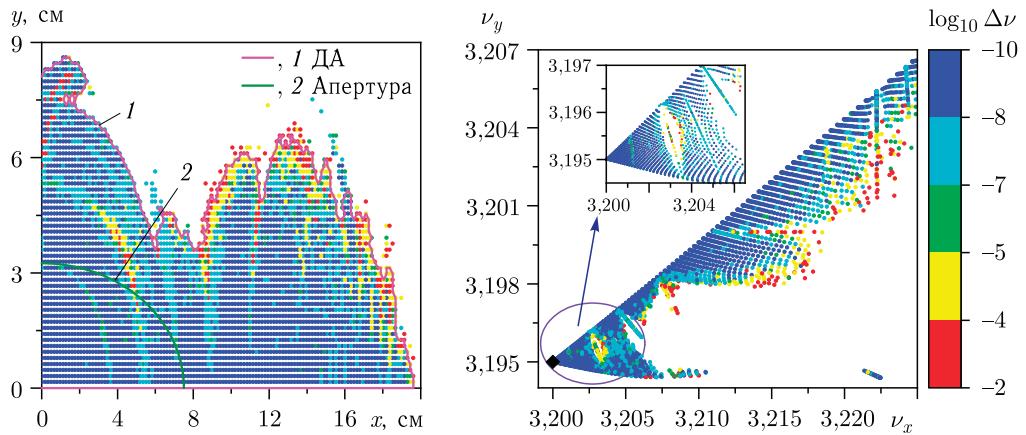


Рис. 8. Частотный анализ динамической апертуры для инжекции с $\delta = 0$ в модифицированной структуре. Ромбом отмечена рабочая точка

набег горизонтальной бетатронной фазы между хроматическими секступолями, равный 3π ; для управления зависимостью частоты от действия добавлено секступольное семейство в центр арок. Проведено сканирование новой структуры (рис. 5).

По результатам сканирования модифицированной структуры были выбраны рабочие точки: для медленного выпуска $\nu_x = 3,3183$, $\nu_y = 3,115$ и для инжекции $\nu_x = 3,2$, $\nu_y = 3,195$. В выбранных рабочих точках были построены динамические апертуры с учетом токов Фуко и нелинейностей основных магнитов, представленные на рис. 6, а также выполнен частотный анализ (рис. 7 и 8). Видно, что отсутствуют направления быстрого утекания, а траектории в области геометрической апертуры являются регулярными. Также в рабочей точке медленного выпуска частоты в области апертуры находятся ниже резонанса $3\nu_x$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе исследована динамическая апертура бустерного синхротрона с электронным охлаждением.

Показано, что базовая конфигурация секступолей не обеспечивает необходимую динамическую апертуру. В связи с этим было принято решение изменить линейную структуру ускорителя для симметризации оптики в арках и оптимизации набега фаз между секступолями одного семейства.

В выбранных рабочих точках была построена динамическая апертура как без учета нелинейностей основных магнитов и нелинейностей, порождаемых токами Фуко, так и с их учетом. Динамическая апертура в выбранных рабочих точках стала выше геометрической.

Для изучения регулярности движения в апертуре был выполнен частотный анализ. Выяснилось, что отсутствуют направления быстрого утекания, а движение частиц в апертуре является регулярным.

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борисков А. С. и др. Оптическая структура бустерного синхротрона // Проблемы ускорительной техники и физики высоких энергий: Тр. междунар. конф. «XXIV Харитоновские тематические научные чтения». 2024. С. 75–81.
2. Блинов М. Ф., Кoon И. А., Востриков В. А., Хлыстов Д. А., Елисеев В. С. Резонансный медленный выпуск из ионного синхротрона для технологических применений // Письма в ЭЧАЯ. 2023. Т. 20, № 4. С. 725–732.
3. Пархомчук В. В., Скринский А. Н. Электронное охлаждение — 35 лет развития // УФН. 2000. Т. 170, № 5. С. 473–493.
4. Popov D.M., Vostrikov V.A., Blinov M.F. Dynamic Aperture of Synchrotron with Electron Cooling // Phys. At. Nucl. 2023. V. 86. P. 2446–2453.

Получено 28 октября 2024 г.