

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО
ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 53.083.8+621.384.665+621.384.6.01

**КАЛИБРОВКА ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКОЙ
МОДЕЛИ НАКОПИТЕЛЯ-ОХЛАДИТЕЛЯ
ИНЖЕКЦИОННОГО КОМПЛЕКСА ВЭПП-5**

© 2011 г. А. В. Петренко

*Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН
Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11
E-mail: petrenko@inp.nsk.su*

Поступила в редакцию 10.06.2010 г.

Описана методика экспериментального исследования линейной оптики циклического накопителя заряженных частиц путем измерения реакции пучка на слабые возмущения отклоняющего и фокусирующего магнитного поля. По результатам измерений искажения замкнутой орбиты пучка и смещения частоты бетатронных колебаний при вариации полей дипольных, квадрупольных и секстипольных магнитов проведена калибровка модели электронной оптики накопителя-охладителя инжекционного комплекса ВЭПП-5. Для всех измеряемых величин получены аналитические выражения, что сделало возможным решить задачу калибровки модели накопителя при помощи одной из распространенных программ расчета ускорительной оптики. Правильность полученной модели проверена модельно-независимым измерением горизонтальной бета-функции и набега фазы бетатронных колебаний между датчиками положения пучка.

ВВЕДЕНИЕ

Магнитные поля, направляющие движение заряженных частиц в циклических накопителях, стабилизируются с высокой точностью. Например, типичная стабильность тока в обмотках электромагнитов $\Delta I/I \sim 10^{-5}$. При этом многочисленные ошибки изготовления и установки магнитных элементов приводят к существенному отклонению реальной оптики накопителя от проектных значений. С другой стороны, некоторые параметры пучка, например частоту бетатронных колебаний и положение замкнутой орбиты, обычно можно измерить с высокой точностью. Это дает возможность провести экспериментальное исследование оптики накопителя вариационным методом, т.е. измерить искажение замкнутой орбиты пучка при слабом возмущении отклоняющих магнитных полей и смещение частот бетатронных колебаний при варьировании фокусирующих магнитных полей. По большому количеству таких измерений можно реконструировать точную модель электронной (либо ионной) оптики накопителя.

Обычно для этой цели строится компьютерная модель эксперимента и находится оптимальный набор скрытых модельных параметров (например, распределение ошибок фокусировки), которые лучше всего соответствуют экспериментальным данным. Калиброванную модель в дальнейшем удобно использовать для предсказания и коррекции различных параметров накопителя, в том числе тех, которые не могут быть измерены

напрямую. Особенно актуальны подобные измерения и калибровка модели накопителя на пусконаладочном этапе его работы.

Накопитель-охладитель инжекционного комплекса ВЭПП-5 [1, 2] (рис. 1) недавно построен в Институте ядерной физики СО РАН для обеспечения экспериментов на встречных пучках интенсивными сгустками позитронов и электронов. В данной статье представлены результаты тестовых запусков накопителя-охладителя с электронным пучком. Особенностью этой работы является то, что в качестве единственной доступной системы диагностики применялись электростатические датчики положения пучка, которые, обладая хорошей чувствительностью, требуют тщательной калибровки и могут давать показания с большими систематическими ошибками. Несмотря на это, используя метод калибровки модели, за счет многократного превышения числа измеряемых величин над числом подгоняемых модельных параметров оказалось возможным надежно определить оптические функции накопителя, а также выявить неисправности датчиков положения пучка и корректирующих магнитов.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Процесс калибровки компьютерной модели накопителя подобен стандартной процедуре оптимизации оптических функций кольца или транспортно-канала. Некоторые распространенные компьютерные программы, используемые для рас-

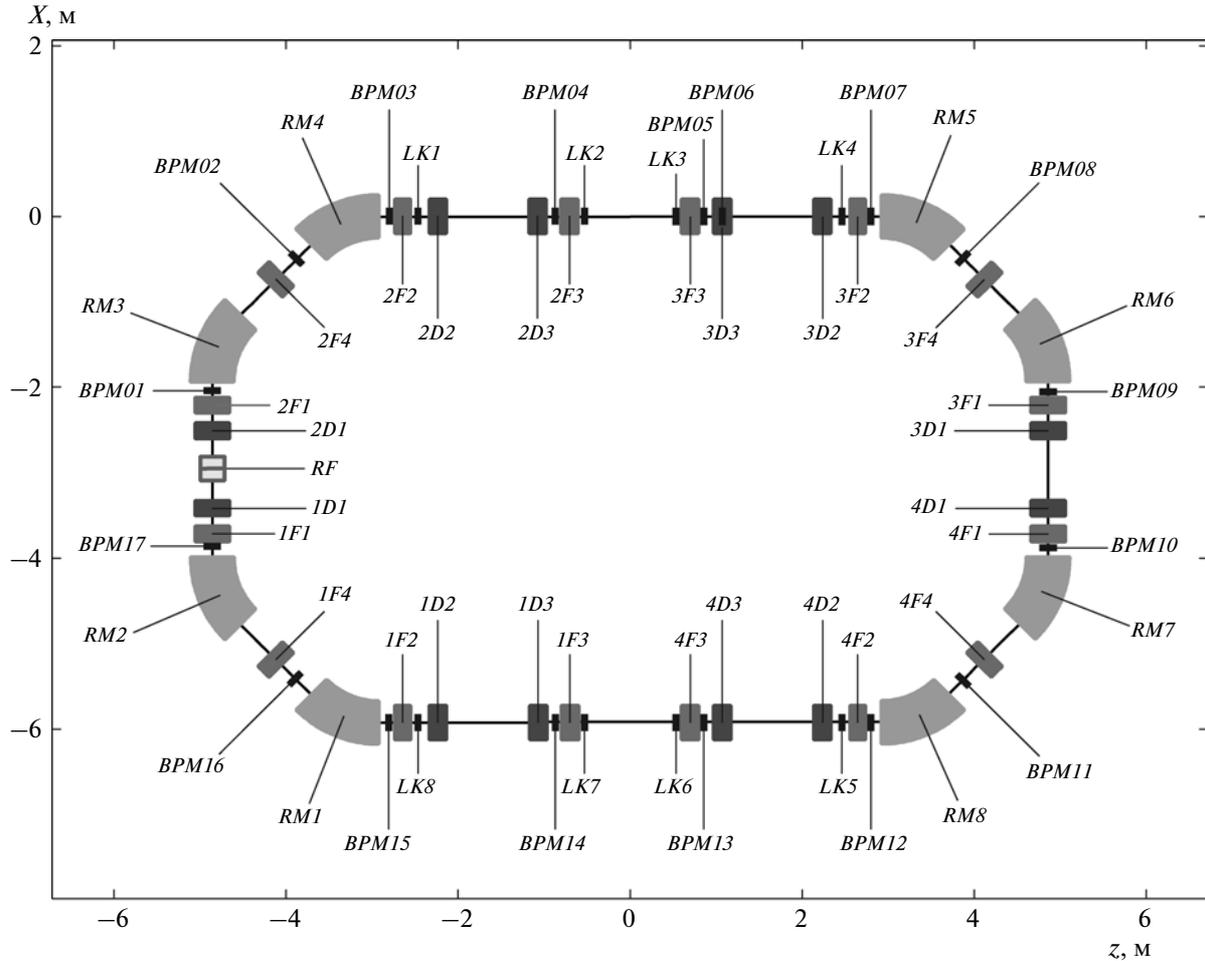


Рис. 1. Накопитель-охладитель инжекционного комплекса ВЭПП-5. *RF* – в.ч.-резонатор; *RM1–RM8* – поворотные магниты; *LK1–LK8* – выдвижные люминофорные экраны, используемые для проводки (первого оборота) пучка; *BPM01–BPM17* – датчики положения пучка (пикап-электроды); элементы, в обозначении которых используется буква *F*, например *4F3*, – фокусирующие по горизонтали квадруполь; с буквой *D* в обозначении, например *4D3*, – дефокусирующие по горизонтали квадруполь.

чета ускорительной оптики [3, 4], имеют встроенный оптимизационный модуль, который позволяет задавать произвольную целевую функцию, записанную в терминах параметров Твисса и элементов транспортных матриц. В этих терминах можно записать как отклик замкнутой орбиты пучка на вариацию дипольного корректора, так и отклик частоты бетатронных колебаний на вариацию квадрупольного корректора. Таким образом, имея аналитические выражения для измеренных откликов, задачу калибровки модели можно решить при помощи стандартных компьютерных программ, используемых для проектирования ускорителей.

Точечный дипольный корректор

Искажение замкнутой орбиты непрерывного (т.е. небанчиванного) пучка под действием ди-

польного корректора пренебрежимо малой длины имеет вид [5, стр. 263]

$$x(s, s_0) = \theta \frac{\sqrt{\beta(s)\beta(s_0)}}{2 \sin \pi \nu} \cos(|\psi(s) - \psi(s_0)| - \pi \nu) = \theta G(s, s_0),$$

где $\beta(s)$ и $\psi(s)$ – соответственно бета-функция и набег фазы бетатронных колебаний; ν – частота бетатронных колебаний; $G(s, s_0)$ – функция Грина для уравнения Хилла (так как точечный корректор описывается δ -функцией в правой части уравнения Хилла).

Длина искаженной орбиты отличается от длины исходной орбиты на величину

$$\Delta L_c = \theta \oint \frac{G(s, s_0) ds}{\rho(s)} = \theta D(s_0),$$

где ρ – радиус поворота в дипольном магните ($\rho = \infty$ вне диполей); $D(s_0)$ – значение дисперсии

онной функции в корректоре. В случае банчи-рованного пучка принцип автофазировки требует постоянства периода обращения частиц. Поэтому их энергия должна измениться так, чтобы период обращения остался таким, каким он был до искажения орбиты. Это приводит к дополнительному смещению замкнутой орбиты, пропорционально дисперсионной функции. В итоге, искажение орбиты банчи-рованного пучка будет иметь вид

$$x(s, s_0) = \theta G(s, s_0) - \theta \frac{D(s)D(s_0)\gamma^2\gamma_t^2}{L(\gamma^2 - \gamma_t^2)}, \quad (1)$$

где γ — релятивистский фактор пучка, γ_t — релятивистский фактор для переходной энергии в накопителе. Для ультрарелятивистских частиц $\gamma \gg \gamma_t$.

Протяженный корректор

В накопителе-охладителе для коррекции орбиты применяются дополнительные обмотки во всех квадрупольных линзах и поворотных магнитах. Длиной дипольного корректора в линзах можно пренебречь, однако это уже нельзя сделать для 45-градусного поворотного магнита.

В общем виде линеаризованное воздействие протяженного корректора с началом в точке s_0 и концом в точке s_1 можно представить как

$$\vec{X}(s_1) = R_c \vec{X}(s_0) + \Delta \vec{X},$$

где R_c — транспортная матрица через выключенный корректор, $\Delta \vec{X} = (\Delta x, \Delta x', 0, 0, \Delta l, 0)^T$ — добавка к фазовым координатам частицы, пропорциональная силе корректора.

В качестве характеристики коррекции поля в поворотном магните удобно использовать параметр $\Delta B/B$ — относительную добавку к полю магнита. Учитывая, что такая добавка к магнитному полю равносильна изменению импульса частицы $\Delta p/p = -\Delta B/B$, воздействие коррекции на пучок можно выразить через элементы матрицы поворотного магнита [5, стр. 58], которые связывают фазовые координаты $x, x', \Delta l$ и $\Delta p/p$ в начале и конце магнита:

$$\begin{pmatrix} x \\ x' \\ \Delta l \end{pmatrix}_{s_1} = \begin{pmatrix} \cos kl & \frac{\sin kl}{k} & \frac{1 - \cos kl}{k^2 \rho} \\ -k \sin kl & \cos kl & \frac{\sin kl}{k \rho} \\ \frac{\sin kl}{k \rho} & \frac{1 - \cos kl}{k^2 \rho} & \frac{kl - \sin kl}{k^3 \rho^2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ x' \\ \Delta p/p \end{pmatrix}_{s_0},$$

где $l = s_1 - s_0$ — длина магнита; ρ — радиус поворота магнита; $k = \sqrt{\frac{1}{\rho^2} + \frac{1}{B\rho} \frac{\partial B_y}{\partial x}}$.

Полагая $x(s_0) = x'(s_0) = 0$ и $\Delta p/p = -\Delta B/B$, получим ненулевые компоненты $\Delta \vec{X}$:

$$\begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta x' \\ \Delta l \end{pmatrix} = -\frac{\Delta B}{B} \frac{1}{k^3 \rho^2} \begin{pmatrix} k\rho(1 - \cos kl) \\ k^2 \rho \sin kl \\ kl - \sin kl \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Эффект, эквивалентный коррекции поля в протяженном поворотном магните, можно получить, расположив по краям магнита два точечных корректора, а ошибку в длине орбиты компенсировать дополнительным слагаемым, пропорциональным дисперсионной функции, по аналогии с формулой (1). Найдем углы для двух таких корректоров, которые сообщали бы добавки к фазовым координатам частицы Δx и $\Delta x'$, рассчитанные из формулы (2):

$$\begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta x' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos kl & \frac{\sin kl}{k} \\ -k \sin kl & \cos kl \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ \theta_0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ \theta_1 \end{pmatrix},$$

откуда

$$\theta_0 = \theta_1 = -\frac{\Delta B(1 - \cos kl)}{B k \rho \sin kl}. \quad (3)$$

Далее находим разницу между истинным изменением длины орбиты Δl , рассчитанным по формуле (2), и тем изменением длины орбиты, которое возникнет в случае двух точечных корректоров, расположенных в начале и в конце поворотного магнита:

$$\Delta l - \frac{1 - \cos kl}{k^2 \rho} \theta = \frac{1}{k^3 \rho^2} \left(2 \frac{1 - \cos kl}{\sin kl} - kl \right) \frac{\Delta B}{B}.$$

Таким образом, искажение замкнутой орбиты банчи-рованного пучка при изменении поля в длинном поворотном магните можно записать в виде

$$x(s) = x_b(s, s_0) + x_b(s, s_1) - \frac{\gamma^2 \gamma_t^2}{\gamma^2 - \gamma_t^2} \frac{D(s)}{L k^3 \rho^2} \left(2 \frac{1 - \cos kl}{\sin kl} - kl \right) \frac{\Delta B}{B}, \quad (4)$$

где $x_b(s, s_0)$ — искажение орбиты от точечного корректора, расположенного в точке s_0 (см. выражение (1)), с углом θ , рассчитанным по формуле (3).

Отклики частоты бетатронных колебаний

Смещение частоты бетатронных колебаний при изменении силы квадрупольной линзы также можно выразить в терминах оптических функций или транспортных матриц. Частоту бетатронных колебаний можно определить по следу матрицы оборота: $\text{tr}(M) = 2 \cos \mu$ (где $\mu = 2\pi\nu$). Вклад квадрупольной линзы в матрицу оборота M можно определить следующим образом:

$$M(s_1) = R_q(k) R(s_1|s_0),$$

где R_q — транспортная матрица квадрупольной линзы, а $R(s_1|s_0)$ — транспортная матрица остальной части кольца (s_0 — начало линзы, s_1 — конец линзы).

Матрица квадрупольного поля для поперечного движения как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскости имеет вид [5, стр. 57]

$$R_q(k) = \begin{pmatrix} \cos kl & k^{-1} \sin kl \\ -k \sin kl & \cos kl \end{pmatrix}.$$

Здесь $l = s_1 - s_0$ — длина квадрупольного поля; $k = \sqrt{K}$, где K — коэффициент геометрической силы квадрупольного поля, который для вертикальной и для горизонтальной плоскостей имеет разный знак:

$$K_x = -K_y = \frac{e}{pc} \frac{\partial B_y}{\partial x}.$$

Поскольку матрица $R(s_1|s_0) = R_q^{-1}M(s_1)$ не зависит от параметра k , выражение для отклика частоты бетатронных колебаний в терминах транспортных матриц можно записать в виде

$$\frac{\partial \mu}{\partial k} = -\frac{1}{2 \sin \mu} \operatorname{tr} \left(\frac{\partial R_q}{\partial k} R_q^{-1} M(s_1) \right).$$

После перемножения всех матриц получим ту же формулу в терминах параметров Твисса в конце квадрупольного поля:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \nu}{\partial k} = & \beta(s_1) \frac{2kl + \sin 2kl}{8\pi} + \alpha(s_1) \frac{\sin^2 kl}{2\pi k} + \\ & + \gamma(s_1) \frac{2kl - \sin 2kl}{8\pi k^2}. \end{aligned} \quad (5)$$

В приближении тонкой линзы выражение (5) упрощается:

$$\beta = \frac{4\pi}{l} \frac{\partial \nu}{\partial K}.$$

Для калибровки модели накопителя-охладителя необходимо использовать формулу (5), так как точность приближения тонкой линзы в нашем случае составляет 5–10%, а точность измерения $\partial \nu / \partial K$ обычно в несколько раз лучше.

Следует отметить, что полученные формулы для отклика частоты бетатронных колебаний можно использовать только вдали от сильных резонансов (например, от линейного резонанса связи): на плоскости (v_x, v_y) расстояние от рабочей точки до линии резонанса должно быть много больше ширины резонанса.

КАЛИБРОВКА МОДЕЛИ

Измерение откликов

Накопитель-охладитель имеет 17 электростатических датчиков положения пучка. Один датчик подключен к осциллографу, а для регистрации сигналов с остальных датчиков используются 16 четырехканальных а.ц.п. (по одному каналу на каждый из четырех пикап-электродов соответствующего датчика). Момент измерения каждого а.ц.п. синхронизован с в.ч.-резонатором накопителя. Всего можно записать 32000 оборотов пучка.

Для определения частот бетатронных колебаний использовалось дискретное преобразование Фурье от сигнала по оборотному положению пучка. При этом когерентные бетатронные колебания возбуждались ударом инфлектора по накопленному пучку. Процесс измерения откликов на вариации всех дипольных и квадрупольных корректоров в накопителе-охладителе занимает около часа. Для каждого корректора последовательно задавались несколько значений и регистрировались показания датчиков положения пучка. Все зависимости оказались с высокой точностью (1–5%) линейными, поэтому для их описания можно использовать приведенные выше формулы.

Автоматизация измерений и управление накопителем-охладителем осуществлялись при помощи EPICS [6], а все манипуляции с данными производились в SDDS-формате [7] посредством тcl-скриптов. Расчеты электронно-оптической системы и калибровка модели проводились в программе Elegant [3]. Данное программное обеспечение является свободно распространяемым и типичным для многих ускорительных установок.

Оптимизационная функция

Исходя из выражений для отклика орбиты и частоты бетатронных колебаний (1), (4), (5) можно теперь сконструировать целевую функцию, предназначенную для калибровки модели:

$$\begin{aligned} F = & \sum_{i,j} \left[\left(\frac{\partial x_i}{\partial \theta_j} \right)_m - \left(\frac{\partial x_i}{\partial \theta_j} \right)_t \right]^2 \frac{1}{\sigma_{ij}^2} + \\ & + \sum_n \left[\left(\frac{\partial v_x}{\partial k_n} \right)_m - \left(\frac{\partial v_x}{\partial k_n} \right)_t \right]^2 \frac{1}{\sigma_n^2}, \end{aligned}$$

где $(\partial x_i / \partial \theta_j)_m$ — измеренное значение отклика орбиты в i -м датчике на вариацию j -го корректора; $(\partial x_i / \partial \theta_j)_t$ — соответствующее теоретическое значение; σ_{ij} — статистическая точность измерения отклика орбиты; во втором слагаемом — аналогичные переменные для откликов частоты горизонтальных бетатронных колебаний на вариации квадрупольных.

Данную целевую функцию можно расширить, включив любые другие измеряемые параметры накопителя, которые могут быть вычислены при оптимизации. В нашем случае подгоняемыми параметрами модели являлись квадрупольные ошибки в линзах и калибровочные коэффициенты для дипольных корректоров и для датчиков положения пучка. При этом в оптимизационную функцию были включены отклики орбиты на все дипольные корректоры, отклики горизонтальной и вертикальной бетатронной частоты на вариацию сил квадрупольных линз, а также дисперсионная функция, измеренная по искажению орбиты пучка при

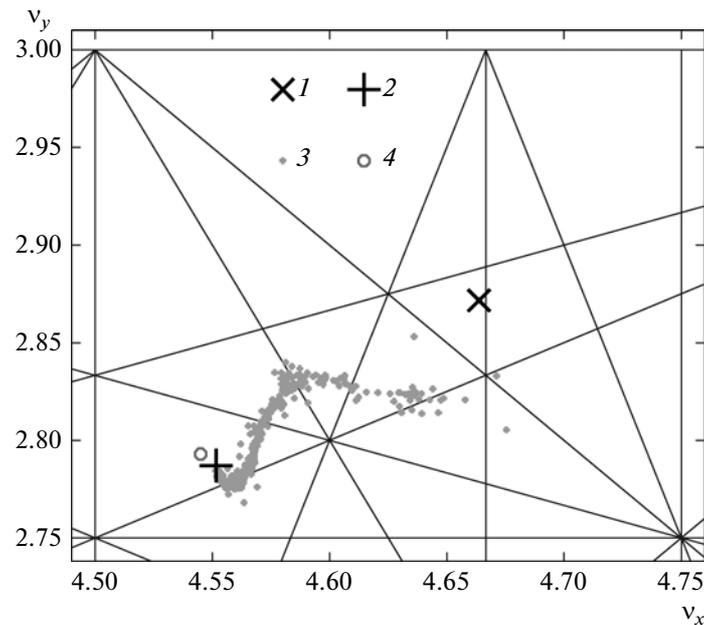


Рис. 2. Частоты бетатронных колебаний, предсказываемые моделью в процессе ее калибровки. 1 – начальная модель, 2 – конечная модель, 3 – в процессе оптимизации, 4 – измерение. Измеренные значения частот не были включены в оптимизационную функцию для того, чтобы убедиться в правильности полученной модели.

смещении частоты в.ч.-резонатора накопителя [5, стр. 265].

В процессе работы над калибровкой модели накопителя-охлаждителя выяснилась интересная особенность данного метода: сходимость оптимизационного алгоритма значительно улучшается, если ввести ограничение снизу на статистические точности измерения откликов, т.е. на σ_{ij} и σ_n в формуле целевой функции. Это связано с тем, что статистическая погрешность определения наклона прямой для некоторых откликов оказывается очень малой (менее 1% от величины отклика), поэтому вес таких измерений в целевой функции становится непропорционально большим и вся оптимизация сводится только к подгонке модели под эти измерения. Другими словами, существует предел точности измерений, который адекватен систематическим ошибкам в описании действительности при помощи модели.

Чтобы убедиться в том, что процесс оптимизации сводится к правильному решению, некоторые измеренные параметры, например частоты бетатронных колебаний, могут быть намеренно не включены в целевую функцию. Калиброванная модель должна предсказывать эти параметры лучше, чем исходная модель (рис. 2).

Результаты сравнения некоторых измеренных и модельных откликов, включенных в оптимизационную функцию, представлены на рис. 3, 4.

Орбита пучка в секступолях

Горизонтальное положение замкнутой орбиты пучка в секступоле может быть вычислено по измерениям откликов частот бетатронных колебаний на вариацию силы секступоля [5, стр. 265]:

$$x_0 = \frac{4\pi \partial v_x}{\beta_x \partial K_2} = -\frac{4\pi \partial v_y}{\beta_y \partial K_2},$$

где $K_2 = \frac{e}{rc} \frac{\partial^2 B_y}{\partial x^2}$ – геометрическая сила секступоля.

Таким образом, для вычисления x_0 необходимо знать β_x или β_y в секступоле. Эти величины могут быть взяты из калиброванной модели. На рис. 5 приведены результаты измерений смещения пучка относительно центров секступолей. Тот факт, что значения x_0 , рассчитанные по откликам v_x и v_y , совпадают, служит подтверждением корректности модели. Измеренные смещения не могут быть объяснены только искажением замкнутой орбиты пучка. Если, например, предположить, что два крайних секступоля справа от квадрупольной линзы выставлены идеально точно, то это значит, что пучок должен в этом месте иметь угол x' больше доступного углового акцептанса накопителя-охлаждителя. Следовательно, ошибка выставки секступолей достигает нескольких миллиметров. По сравнению с апертурой секступоля, равной 68 мм, это немного, однако соответствующее возмущение квадрупольной фокуси-

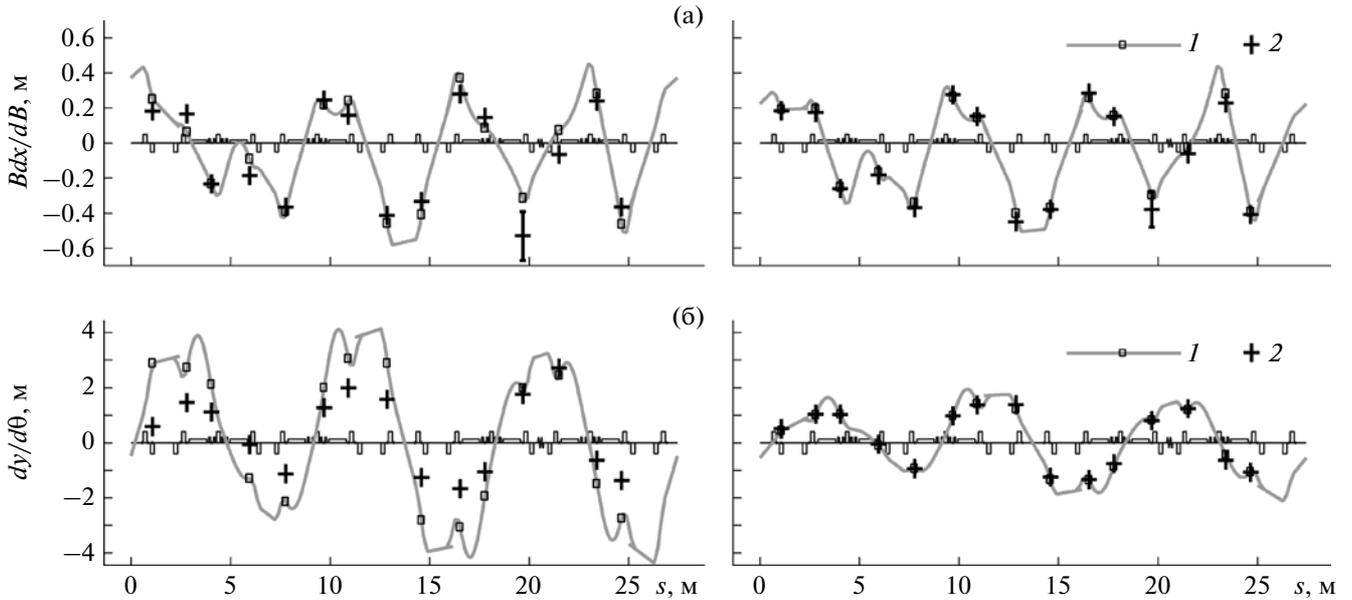


Рис. 3. Отклики замкнутой орбиты на изменение горизонтального (магнит $RM6$) (а) и вертикального (линза $4F1$) (б) корректоров: слева – до калибровки модели, справа – после. 1 – рассчитанные значения, 2 – данные измерений.

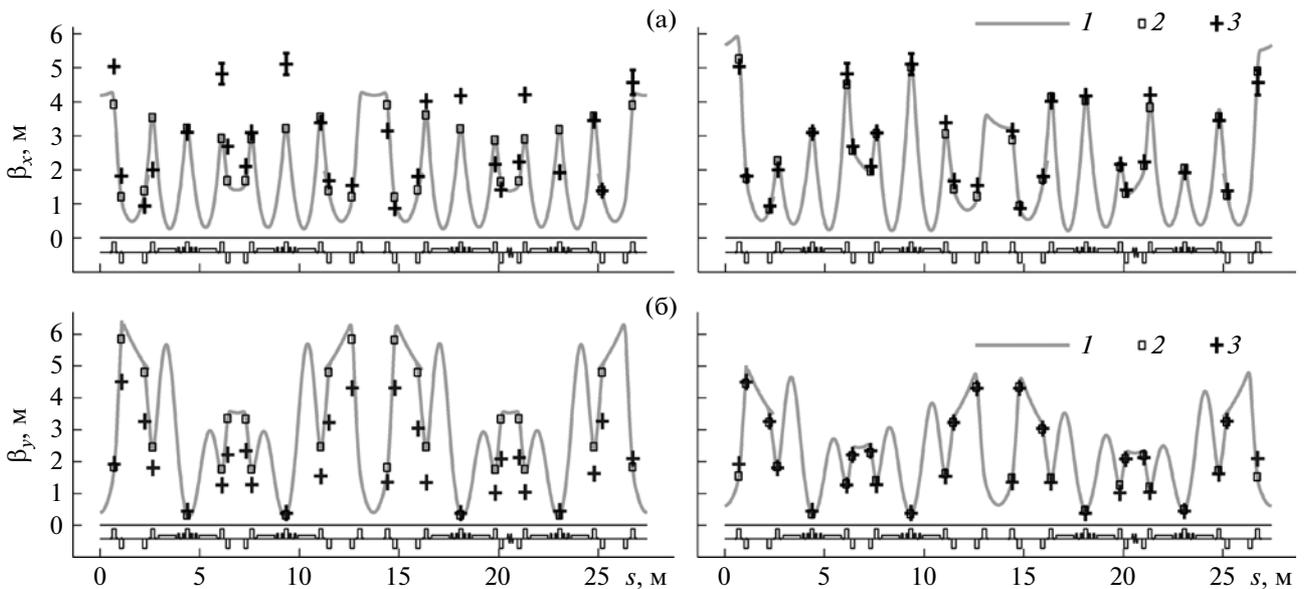


Рис. 4. Сравнение измеренных и модельных бета-функций: слева – до калибровки модели; справа – после. 1 – β ; 2 – рассчитанные значения $\frac{4\pi}{l} \frac{dv_{x,y}}{dK}$; 3 – измеренные значения $\frac{4\pi}{l} \frac{dv_{x,y}}{dK}$.

ровки от такого смещения секступоля приводит к сильному нарушению симметрии бета-функций в накопителе. Симметрия оптических функций накопителя-охладителя важна для обеспечения достаточно большой динамической апертуры в режиме накопления позитронов.

Пооборотные измерения

Осциллограммы когерентных бетатронных колебаний, синхронно записанные датчиками положения пучка, можно использовать для модельно-независимого определения бета-функций и набегов фаз бетатронных колебаний.

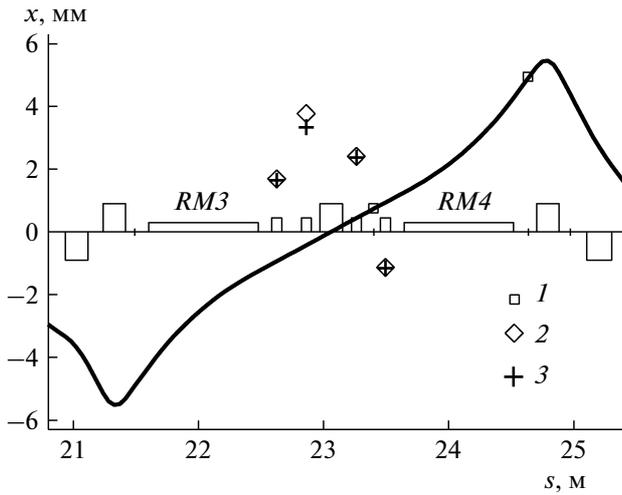


Рис. 5. Горизонтальное смещение замкнутой орбиты относительно центров секступолей. Для сравнения сплошной линией показана модельная орбита в предположении, что два ближайших датчика положения пучка дают абсолютно точные показания. 1 – показания датчиков положения пучка; 2 и 3 – смещение орбиты в секступоле, рассчитанное соответственно как $\left(+\frac{4\pi}{l\beta_x} \frac{dv_x}{dK} \right)$ и $\left(-\frac{4\pi}{l\beta_y} \frac{dv_y}{dK} \right)$.

Пооборотное значение горизонтальной координаты частицы, совершающей свободные бетатронные колебания, записывается как

$$x(s, t) = \sqrt{J\beta(s)} \cos(\mu t + \psi(s) + \psi_0),$$

где t – номер оборота, J и ψ_0 – константы. Найдем усредненное по t произведение показаний двух датчиков положения пучка, расположенных в точках s_1 и s_2 , т.е. определим, насколько коррелированы сигналы этих датчиков:

$$\langle x(s_1, t)x(s_2, t) \rangle = J\sqrt{\beta_1\beta_2} \langle \cos(\mu t + \psi_1)\cos(\mu t + \psi_2) \rangle,$$

где $\beta_{1,2} = \beta(s_{1,2})$ и $\psi_{1,2} = \psi(s_{1,2}) + \psi_0$.

После усреднения получим

$$\langle x(s_1, t)x(s_2, t) \rangle = J\sqrt{\beta_1\beta_2} \cos(\psi_2 - \psi_1)/2.$$

Из этой формулы легко выразить бета-функцию (полагая $s_1 = s_2$) и косинус набега фазы бетатронных колебаний между двумя датчиками:

$$\beta(s) = 2 \langle x^2(s, t) \rangle / J; \tag{6}$$

$$\cos \Delta\psi = \frac{\langle x(s_1, t)x(s_2, t) \rangle}{\sqrt{\langle x^2(s_1, t) \rangle \langle x^2(s_2, t) \rangle}}, \tag{7}$$

где $\Delta\psi = \psi(s_2) - \psi(s_1)$.

На рис. 6 приведены результаты обработки по оборотным измерениям с помощью описанного метода. Когерентные бетатронные колебания пучка возбуждались в накопителе-охладителе горизонтальным ударом инфлектора. Для подавления шумов до проведения расчетов с использованием формул (6) и (7) измеренные сигналы пропускались через полосовой фильтр на основе быстрого преобразования Фурье. Диапазон пропускаемых фильтром частот (0.53–0.57) соответствует окрестности частоты горизонтальных бетатронных колебаний.

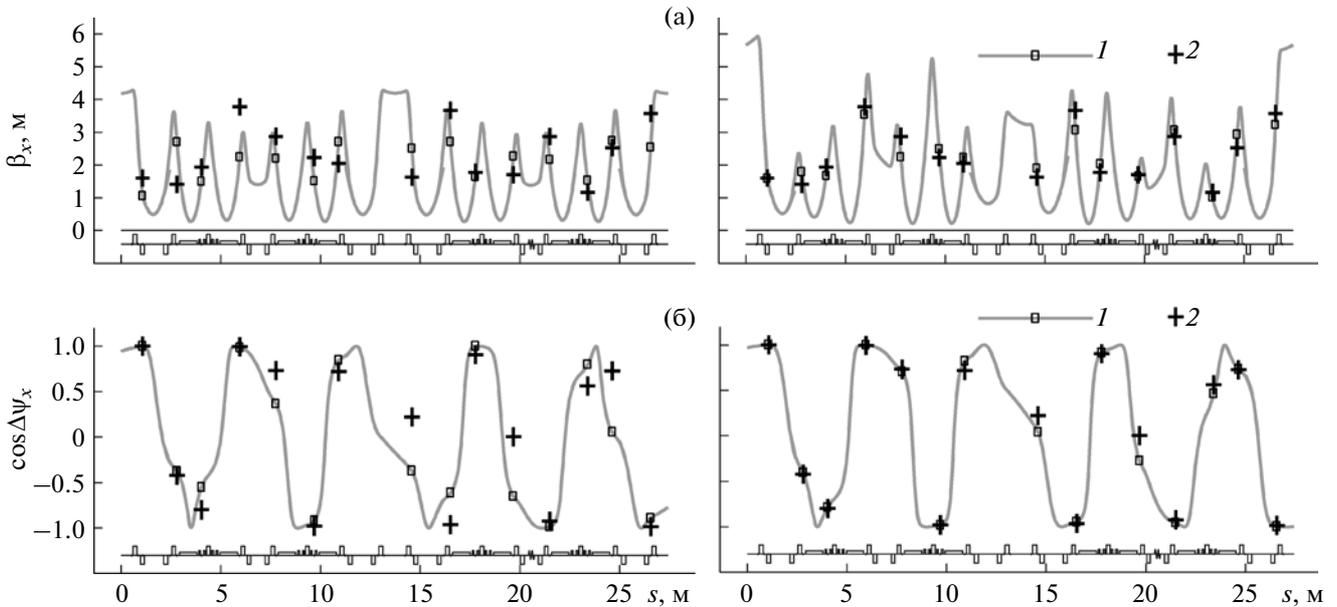


Рис. 6. Сравнение модельных и измеренных значений бета-функции (а) и косинуса набега фазы (б) бетатронных колебаний: слева – до калибровки модели, справа – после. За начало отсчета по фазе выбран датчик ВРМ06 (первый на этом рисунке). Данные измерения не были включены в оптимизационную функцию, а использовались для проверки правильности калибровки модели. 1 – рассчитанные значения, 2 – измеренные.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

После калибровки численная модель накопителя-охладителя стала хорошо описывать такие нелинейные характеристики накопителя, как хроматизм и смещение частот бетатронных колебаний при различных искажениях орбиты. Из этого можно сделать вывод, что паразитная секступольная компонента в накопителе мала.

Развитая в данной работе методика в дальнейшем может пригодиться для согласования накопителя-охладителя с позитронным пучком, имеющим большой фазовый объем. Для эффективного захвата позитронов в накопителе необходимо откорректировать замкнутую орбиту и согласовать оптические функции кольца и каналов инжекции. В накопителе предусмотрена возможность поочередного накопления электронного и позитронного пучков без изменения токов в обмотках магнитов. Очевидно, измерять и корректировать оптические функции и замкнутую орбиту будет удобнее при помощи электронного пучка, который легче накопить до большой интенсивности (при малом количестве накопленных частиц невозможно измерить замкнутую орбиту датчиками положения пучка).

Калиброванная модель может быть использована для определения смещения замкнутой орбиты пучка относительно центров квадрупольей. Для этого необходимо измерить отклики орбиты в датчиках положения пучка на вариацию силы квадрупольей. В накопителе-охладителе такие отклики измеримы, хотя это и требует более интен-

сивного пучка, чем в случае измерения откликов частоты бетатронных колебаний.

Автор признателен А.А. Валишеву за пояснение особенностей калибровки модели на основе пучковых измерений, а также Н.С. Диканскому и П.В. Логачеву за помощь при запуске накопителя. Отдельное спасибо Майклу Борланду (Michael Borland), автору программы Elegant, за оперативные ответы на все возникшие по ходу работы вопросы. Также я благодарен К.В. Астрелиной за помощь в составлении файла электронно-оптической структуры накопителя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анашин В.В., Беломестных С.А., Ворошилов А.Н. Препринт 92-44 ИЯФ СО РАН. Новосибирск, 1992; <http://15.inp.nsk.su/injector/docs/DampingRing.pdf>
2. Астрелина К.В., Блинов М.Ф., Всеволожская Т.А. // ЖЭТФ. 2008. Т. 133. Вып. 1. С. 94.
3. Borland M. Preprint LS-287 Advanced Photon Source, 2000; <http://www.aps.anl.gov/asd/oag/software.shtml>
4. De Maria R., Schmidt F., Skowronski P.K. // Proc. of ICAP 2006. Chamonix, France. P. 213; <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/ICAP06/PAPERS/WEPPP14.PDF>
5. Handbook of Accelerator Physics and Engineering. / Ed. by A. Chao and M. Tigner. Singapore: World Scientific, 1999.
6. <http://www.aps.anl.gov/epics/>
7. Borland M., Emery L. // Proc. ICALEPCS 1995. (Chicago, Illinois) CONF-96/069. Fermilab Report, 1996. P. 653; <http://www.aps.anl.gov/asd/oag/software.shtml>