

# Оценка влияния ошибок юстировки магнитов на искажения орбиты УНК-600

Ю.И. Кирочкин, И.И. Петренко, Е.В. Ткаченко, П.Н. Чирков  
ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий, Протвино, Россия

## Введение

Монтаж такого большого по размерам ускорителя как УНК-600 (~21 км) подразумевает установку с необходимой точностью прежде всего квадрупольных линз на теоретическую замкнутую орбиту. Задание положения этой орбиты в туннеле ускорителя и установка на нее квадруполь производятся с некоторыми ошибками. Большая длина туннеля ускорителя, пролегание его в участках земной поверхности с различной геологической природой и воздействие всевозможных техногенных процессов не исключают возможность смещения отдельных частей магнитной структуры друг относительно друга. Смещения линз от их теоретического положения из-за перечисленных выше факторов в общем случае приводят к тому, что реальная замкнутая орбита пучка будет проходить в вакуумной камере с отклонениями от ее геометрической оси. Поэтому суть задачи состоит в уменьшении этих искажений до приемлемого уровня, обеспечивающего успешный запуск ускорителя.

Прогнозирование необходимой точности установки и юстировки магнитов и оценка влияния вносимых при этом ошибок на искажения замкнутой орбиты пучка осуществляется только с использованием численного моделирования. Это моделирование проводится с учетом всех существенных ошибок, вносимых на последовательных этапах геодезических и монтажных работ, связанных с установкой магнитов в туннеле ускорителя:

- построение наземной сети геодезических пунктов;
- установка 12 базовых квадруполь в туннеле;
- юстировка квадруполь в секциях ускорителя между базовыми магнитами;
- компенсация обнаруженных смещений линз внутри секции и углов излома трассы в базовых квадрупольях, т.е. в местах стыковки секций.

## Последовательность геодезических работ и ошибки

Для точного расположения ускорителя в пространстве на поверхности земли создается сеть геодезических пунктов. Для предотвращения неконтролируемого влияния техногенных процессов на положение геодезических пунктов сеть этих пунктов размещается достаточно далеко от туннеля. Существующие геодезические методы и имеющиеся средства измерений позволяют определить взаимное положение соседних пунктов внешней сети с ошибками  $\eta_{наз}$  (см. табл.1), которые являются коррелированными между собой.

**Базовые квадруполь.** Отталкиваясь от сети внешних знаков, определяется положение наземных приствольных геодезических знаков, закладываемых непосредственно вблизи шахт или вертикальных стволов и распределенных приблизительно

равномерно по длине ускорителя. Определение положения приствольных знаков вносит дополнительные ошибки  $\eta_{ств}$  (см. табл. 1).

Для создания в туннеле подземных геодезических сетей через вертикальные стволы (шахты) производится снос вниз на горизонт туннеля координат наземных приствольных знаков. Из этих подземных знаков выбираются 12, называемых исходными, которые используются для юстировки оборудования. Определение координат положения этих знаков относительно приствольных (наземных) производится с ошибкой  $\eta_{сн}$  (см. табл. 1).

Затем с дополнительной ошибкой  $\eta_{уст}$  (см. табл. 1) определяются положения так называемых базовых квадруполей, находящихся на минимальном расстоянии от соответствующих исходных знаков.

Пара соседних базовых линз задает начало и конец секции магнитной структуры ускорителя. Каждая такая секция заполняется квадруполями независимо от процедуры расстановки магнитов в других секциях. Таким образом, любой базовый квадруполь ( $p = 1, \dots, 12$ ) может быть установлен на теоретическую замкнутую орбиту с суммарной ошибкой  $\eta_p = \eta_{наз} + \eta_{баз} = \eta_{наз} + (\eta_{ств} + \eta_{сн} + \eta_{уст})$ . Поскольку величины, входящие в  $\eta_{баз}$ , являются случайными и независимыми между собой и от квадруполя к квадруполю, то  $\sigma_{баз}^2 = \sigma_{ств}^2 + \sigma_{сн}^2 + \sigma_{уст}^2$ .

Таблица 1. Среднеквадратичные ошибки установки базовых квадруполей (в миллиметрах).

Ошибка	$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\sigma_s$	Вид операции
$\eta_{наз}$	9.0	2.0	9.0	Определение взаимного положения соседних пунктов наземной геодезической сети.
$\eta_{ств}$	5	0.5	5	Определение положения наземных приствольных знаков вблизи шахтных вертикальных стволов.
$\eta_{сн}$	2	2	2	Снос координат на горизонт туннеля (исходные знаки).
$\eta_{уст}$	2	2	2	Установка базовых квадруполей от исходных знаков.
$\eta_{баз}$	5.7	2.9	5.7	Ошибка положения базового квадруполя без учета $\eta_{наз}$ .

**Расстановка квадруполей в секциях.** Первой линзой секции является базовая линза. Каждая последующая линза внутри секции устанавливается следующим образом [1]. По геодезическим знакам (реперам), укрепленным на каждой линзе, производится измерение высоты и сторон треугольника, образованного знаками на данной линзе и двух соседних. Последовательным нивелированием также определяется высотное положение линз. После измерения в последнем треугольнике, включающем другую базовую линзу секции, получаем замкнутую линейную систему уравнений, связывающую измеренные превышения с неизвестными положениями квадруполей. Точность определения положений квадруполей, которое они заняли после предварительной установки, дается решением этой системы и зависит от ошибки измерений превышений. Измерения в процессе юстировки должны производиться с ошибкой  $\varepsilon_{ю}$ , среднеквадратичная величина которой не превышает

$$\begin{aligned} \sigma_{x,ю} &= 50 \text{ мкм} && \text{при определении высоты треугольника в плане,} \\ \sigma_{y,ю} &= 60 \text{ мкм} && \text{при определении превышений соседних линз по вертикали.} \end{aligned}$$

Остаточные ошибки положения линз на данной секции относительно теоретической орбиты, опирающейся на реперные знаки базовых квадруполей, после внесения расчетных поправок, составляют величину  $\eta_{\text{но}}$ . Распределение среднеквадратичной величины этой ошибки по длине секции будет иметь параболический вид с максимумом для линз в центральной части секции. Максимальные значения для наиболее длинной секции ( $\sim 2,2$  км) составляют  $\bar{\sigma}_{x,\text{но}} = 5,1$  мм,  $\bar{\sigma}_{y,\text{но}} = 4,4$  мм.

**Устранение изломов трассы.** Поскольку установка линз в отдельных секциях производится независимо, то в местах их стыковки, т.е. в центрах базовых линз  $Q_p$  будут иметь место изломы трассы (см. рис. 1). Величина угла этих изломов  $\vartheta_p$  определяется двумя независимыми источниками угловых ошибок.

- Первый источник — это неточность определения положения самих базовых квадруполей. Из-за взаимного поперечного смещения базовых квадруполей  $Q_{p-1}$ ,  $Q_p$  и  $Q_{p+1}$  базовый ход  $\vec{q}_p$  на  $p$ -ой секции претерпевает излом на угол  $\delta_p$  относительно базового хода  $\vec{q}_{p-1}$  на  $(p-1)$ -ой секции.
- Второй источник излома обусловлен отклонениями ходов трассы от базовых направлений  $\vec{q}$  в самих секциях (см. углы  $\delta''_{p-1}$  и  $\delta'_p$  на рис. 1). Так как секции юстируются независимо, то и эти углы являются случайными и независимыми.

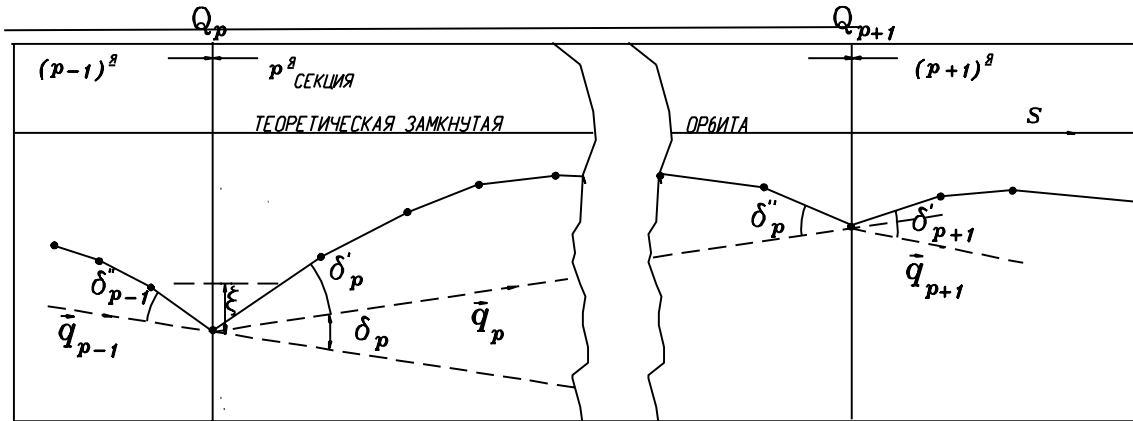


Рис. 1: Излом трассы в точке стыковки двух соседних секций.

Полный угол излома трассы в центре  $Q_p$  равен  $\vartheta_p = \delta_p + \delta''_{p-1} + \delta'_p$ . Согласно проведенным расчетам (см. табл. 2) такие изломы могут приводить к существенным искажениям замкнутой орбиты. Для уменьшения этих искажений было рассмотрено несколько процедур. Наиболее простым и эффективным оказалось смещение базовых квадруполей. Смещение базового квадруполя  $Q_p$  на величину  $\xi_p$  (см. рис. 1) определяется таким образом, чтобы вызываемое угловое возмущение орбиты пучка равнялось измеренному углу  $\vartheta_p$ . При величинах и характере ошибок, с которыми производится юстировка, согласно расчетам потребуются смещения, среднеквадратичная величина которых не будет превышать  $\sigma_{\text{max}} = 0,5$  мм, что вполне допустимо.

## Численное моделирование

**Влияние геодезических ошибок на искажения орбиты.** После каждого этапа геодезических работ с учетом всех накопленных ошибок и их корреляции генерируется возможное положение  $\{\eta_i\}$  всех линз ускорителя относительно теоретической замкнутой орбиты ( $i$  – номера линз,  $\eta = x$  или  $y$ ). Для каждой случайной реализации  $\{\eta_i\}$  рассчитываются положения реальной замкнутой орбиты  $\eta_i^{(o)}$  в каждой линзе. Величины  $\eta_i^{(o)}$  и поперечные размеры вакуумной камеры в  $i$ -ой линзе в  $\eta$ -ом направлении пропорциональны модулю функции Флоке  $\sqrt{\beta_{\eta,i}}$ , который существенно меняется вдоль магнитной структуры ускорителя [2]. Поэтому для характеристики величины искажения реальной орбиты и степени ее опасности используется параметр  $\chi_\eta$  — размах между максимальным и минимальным нормированными отклонениями орбиты от оси вакуумной камеры, т.е.

$$\chi_\eta = \max_i \left\{ (\eta_i^{(o)} - \eta_i) \sqrt{\beta^*/\beta_{\eta,i}} \right\} - \min_i \left\{ (\eta_i^{(o)} - \eta_i) \sqrt{\beta^*/\beta_{\eta,i}} \right\},$$

где  $\beta^* = 152$  м — максимальное значение  $\beta$ -функции в регулярной части магнитной структуры УНК-600.

Найденный таким образом размах  $\chi_\eta$  для одной реализации  $\{\eta_i\}$  случайных ошибок также является случайной величиной. Поэтому за численное значение размаха искажений орбиты принимается величина  $\chi_\eta^{0,95}$  — 95%-ный порог распределения  $\chi_\eta$ , получающегося при 100 реализациях  $\{\eta_i\}$ , т.е. с вероятностью 95%  $\chi_\eta \leq \chi_\eta^{0,95}$  или, соответственно, с вероятностью 5 %  $\chi_\eta \geq \chi_\eta^{0,95}$ . Результаты всех этих расчетов представлены в табл.2.

Таблица 2. Размах искажений замкнутой орбиты после очередного этапа геодезических работ.

№	Этап	$\chi_x^{0,95}$ , мм	$\chi_y^{0,95}$ , мм
1	Влияние ошибок развертывания сети наземных пунктов геодезической сети	10.4	1.6
2	Влияние ошибок установки базовых квадрупольей	16.2	3.1
3	Влияние ошибок установки линз внутри секций	27.2	8.6
4	Уменьшение размаха искажений орбиты смещением базовых линз	15.8	7.9

**Влияние ошибок магнитных измерений осей квадрупольей и разброса интегралов поля в диполях на искажения орбиты.** Помимо рассмотренных ошибок, связанных с геодезическими измерениями, имеется еще одна — неточность определения положения оптических осей квадрупольных линз при магнитных измерениях и их привязке к реперным знакам. Среднеквадратичная величина этой ошибки не должна превышать  $\sigma_{x,y} = 100$  мкм. Результаты моделирования этого дополнительного вклада с учетом окончательных ошибок геодезических построений дают  $\chi_x^{0,95} = 26,6$  мм,  $\chi_y^{0,95} = 23,1$  мм.

От уже выставленных квадрупольей будут юстироваться дипольные магниты. В УНК-600 используются два типа диполей МА и МВ. Систематическое различие между интегралами поля диполей двух типов  $(\vec{H}_A - \vec{H}_B)/H = 30 \times 10^{-4}$  при поле инжекции. Кроме того, разброс величин этих интегралов в группе каждого типа также

приводит к дополнительным искажениям орбиты. Используя специальную процедуру сортировки и расстановки диполей в магнитной структуре ускорителя [3], можно как бы эффективно уменьшить исходный разброс до  $\sigma_{H,ост} = 6 \times 10^{-4}$ . Результаты моделирования с учетом ошибок полей диполей дают  $\chi_x^{0,95} = 36,3$  мм,  $\chi_y^{0,95} = 25,5$  мм.

### Заключение

Из проведенного моделирования следует, что с приемлемой вероятностью и с учетом всех наиболее существенных ошибок максимальный размах искажений замкнутой орбиты в УНК-600 не будет превышать  $36,3 \times 25,5$  мм<sup>2</sup> при апертуре камеры Ø70 мм. Таким образом, даже без включения запроектированной системы коррекции орбиты имеется реальная возможность осуществить первый оборот пучка в ускорителе.

### Список литературы

- [1] Ю.И. Кирочкин и др. Общие принципы геодезического обеспечения сооружения ускорительно-накопительного комплекса (УНК). — Препринт ИФВЭ 91-19, Протвино, 1991.
- [2] В.И. Балбеков, Ю.М. Носочков. — Препринт ИФВЭ 83-191, Серпухов, 1983.
- [3] И.И. Петренко и др. Методика расстановки магнитов в 1-ой ступени УНК. — Труды XIV совещания по ускорителям заряженных частиц. Протвино, 1994.