

Юстировка магнитной структуры У70 и коррекция вертикальных искажений орбиты.

П.Н. Чирков, ИФВЭ

Ускорение поляризованных протонов в У70 \Rightarrow жесткие требования к ускорителю:

- допуск на вертикальное смещение блоков ± 0.5 мм,
- максимальные вертикальные искажения орбиты ≤ 0.5 мм. ?

Юстировка 250 тонных магнитов в пределах ± 0.5 мм в принципе осуществима, поскольку 40 лет назад она была сделана на уровне существенно лучше чем это сейчас требуется.

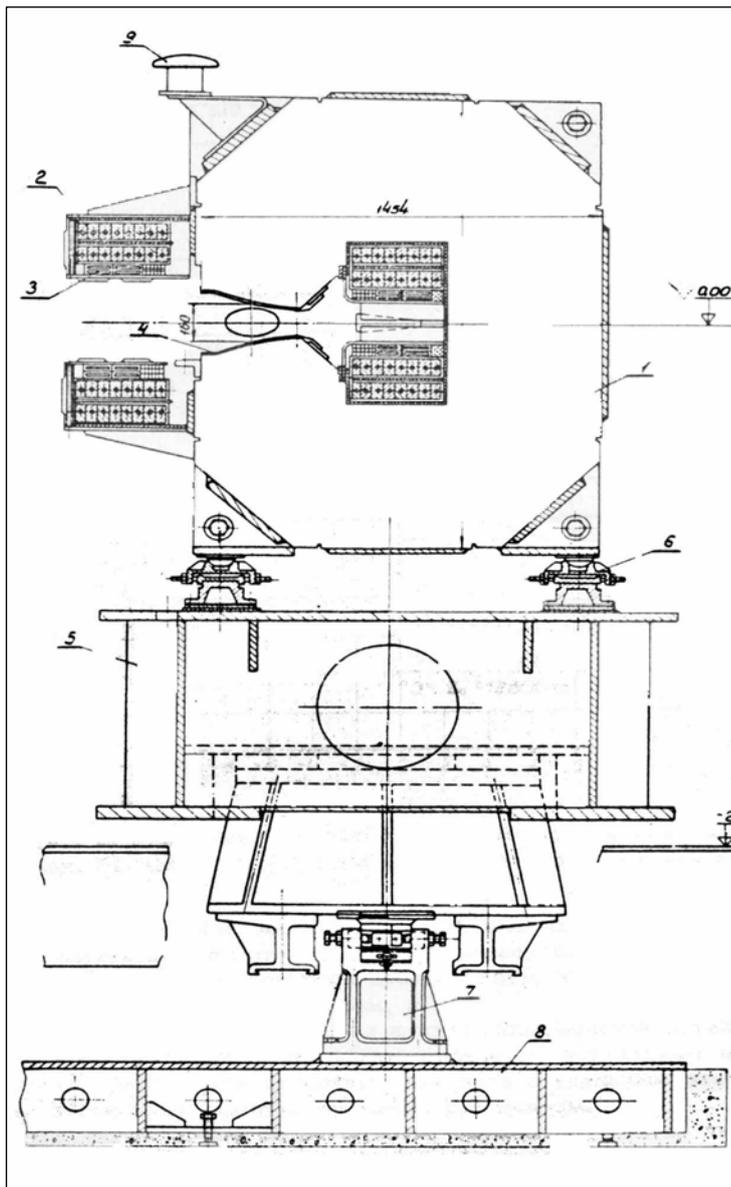


Рис. 1: Поперечное сечение магнита:

1. магнитопровод,
2. основная обмотка,
3. дополнительная обмотка,
4. полюсная обмотка,
5. несущая (мостовая) балка,
6. регулировочные механизмы пакетов,
7. регулировочные механизмы блока,
8. фундаментная плита,
9. верхний геодезический знак.

Магнитный блок состоит из 5 пакетов.
Вес пакета – около 40 тонн.

RMS точность измерения положения пакетов внутри магнитных блоков:

$$\langle \delta\zeta \rangle = 10 \text{ мкм по вертикали,}$$

$$\langle \delta\gamma \rangle = 10'' \text{ угол наклона медианной плоскости пакета.}$$

Точность расстановки пакетов:

$$\Delta\zeta_{\max} = \pm 0.1 \text{ мм по вертикали.}$$

RMS точность установки блоков:

$$\langle \delta\zeta \rangle = 0.1 \text{ мм по вертикали.}$$

Точность установки блоков

(предельные значения):

$$\Delta\zeta_{\max} = \pm 0.2 \text{ мм по вертикали,}$$

$$\gamma_{\max} = \pm 30'' \text{ угла наклона.}$$

Можно ли такую юстировку осуществить в нынешних условиях? Все зависит от наличия и работоспособности подъемных механизмов, геодезических приборов соответствующей точности, специалистов и финансирования.

Как долго такая точная юстировка может сохраняться ?

Наш ускоритель построен на известняках Средне-Русской платформы.

Исследования показали:

- известняки подвержены периодическим вертикальным деформациям, достигающим до 1 мм, что обусловлено подъемом уровня подземных вод в период весеннего паводка и сезонными изменениями термического режима;
- эти деформации носят линейный характер;
- **rms** уклонение реперов, заложенных на глубину $7 \div 12$ м, от вероятнейшей плоскости достигает величины ± 0.15 мм;
- в период весенних паводков наблюдались разломы площадки до 1 мм на длине, равной радиусу кольца.

Действие природных факторов было подтверждено высотными измерениями положения магнитных блоков (Рис.2 и 3): вертикальное смещение блоков за полгода превысило 1.6 мм.



Рис.2: Высотное положение в мм центров магнитных блоков с номерами N :

+ – декабрь 1966 года, ○ – май 1967 года.

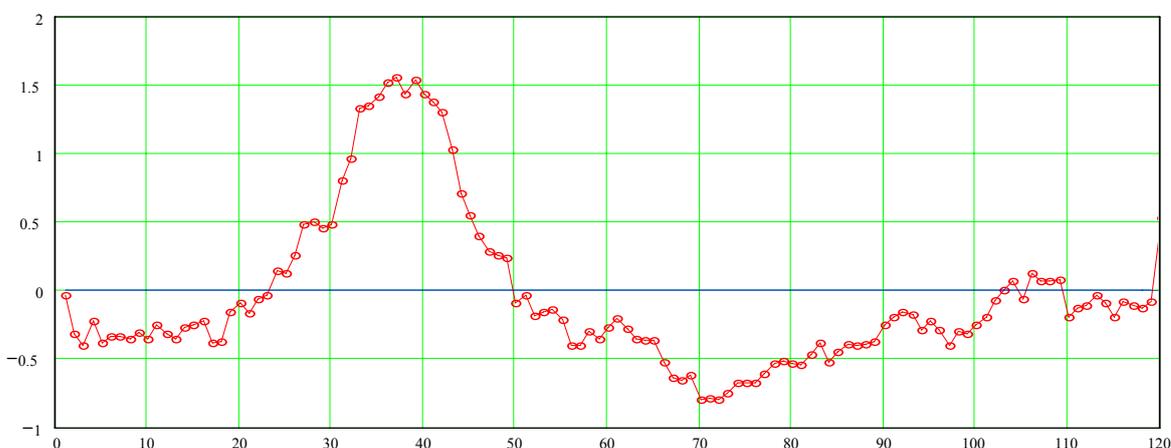


Рис.3: Вертикальное смещение блоков за полгода с декабря 1966 по май 1967 года.

Сильное техногенное воздействие на известняковое основание продолжалось в течение примерно последующих 20 лет:

- создание разборной бетонной защиты в здании 1БВ,
- рытье котлована для галереи с западной стороны от экспериментальныйзала,
- наращивание земляной насыпи над кольцевым залом ускорителя,
- сооружение Бустера, канала УНК и самого кольца УНК.

На рисунках 4 и 5 – высотное положение магнитных блоков по геодезическим измерениям последнего десятилетия.

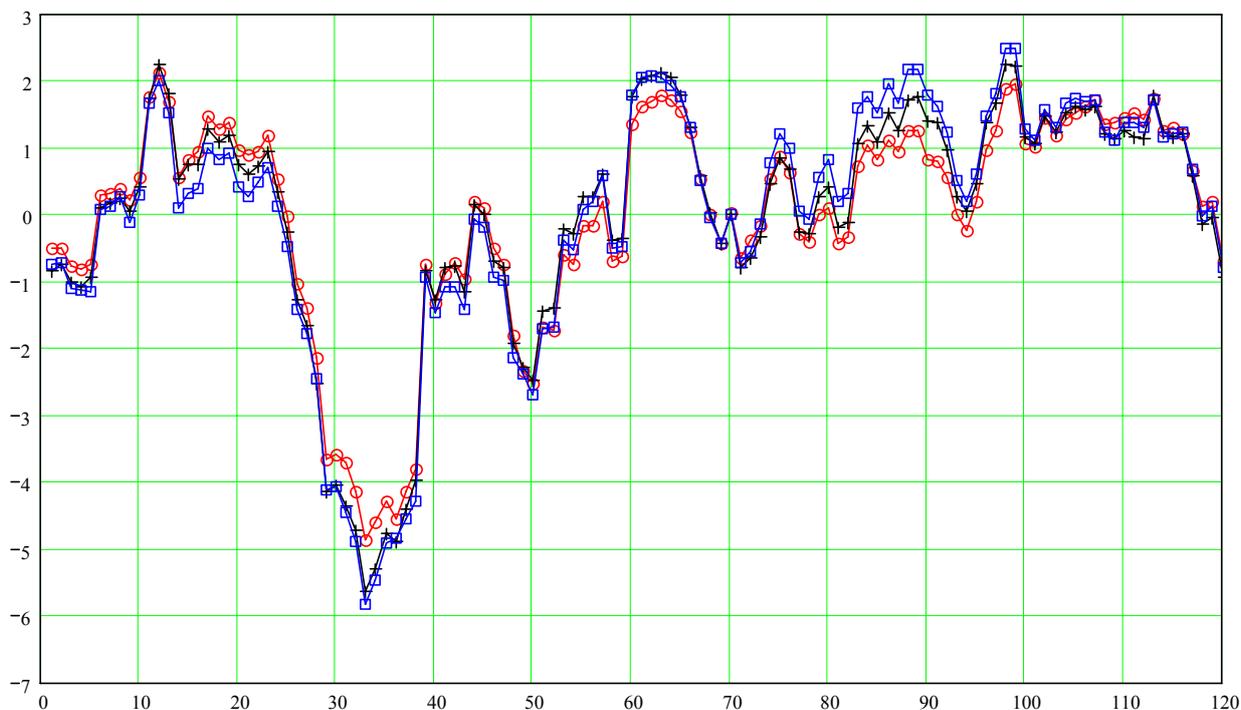


Рис.4: Высотное положение (в мм) центров магнитных блоков с номерами N
○ - измерения 1992 года, + - измерения 1999 года, □ - измерения 2004 года.

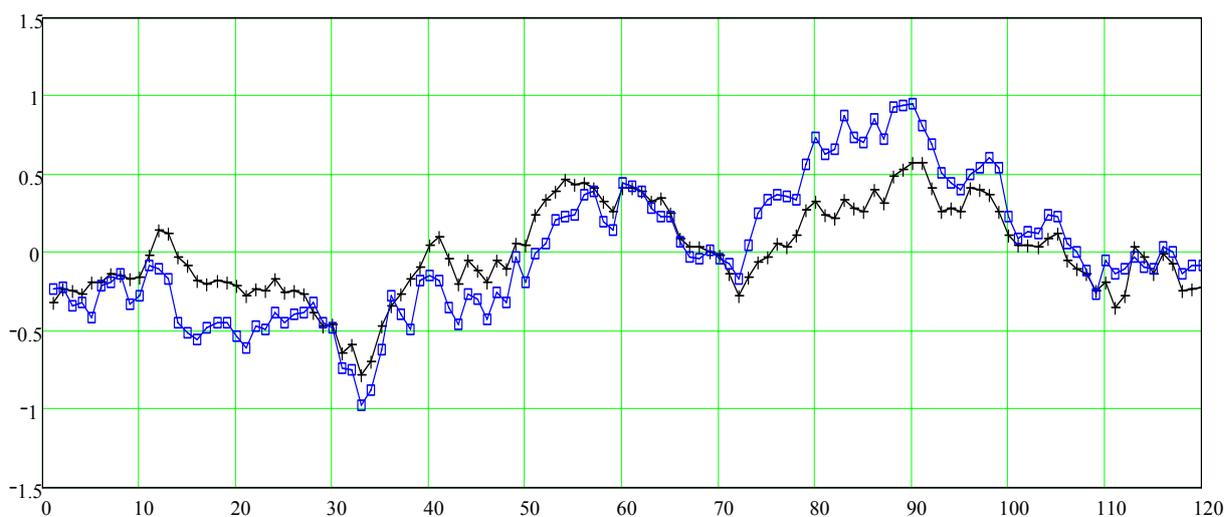


Рис.5: Смещение высотного положения (в мм) центров магнитных блоков
1999 года (+) и 2004 года (□) относительно 1992 года.

Смещение не велико и могло бы считаться допустимым. Но все три цикла измерений проводились в одно и то же время года, а именно – в сентябре, и не отражают возможных сезонных влияний.

Измерение плано-высотного положения пакетов внутри блоков показали, что имеются поперечные смещения пакетов, которые в ряде случаев в несколько раз (в особенности по вертикали) превосходят начальную точность расстановки пакетов. То же самое относится и к поперечным завалам γ пакетов в блоках (см. Рис. 6).

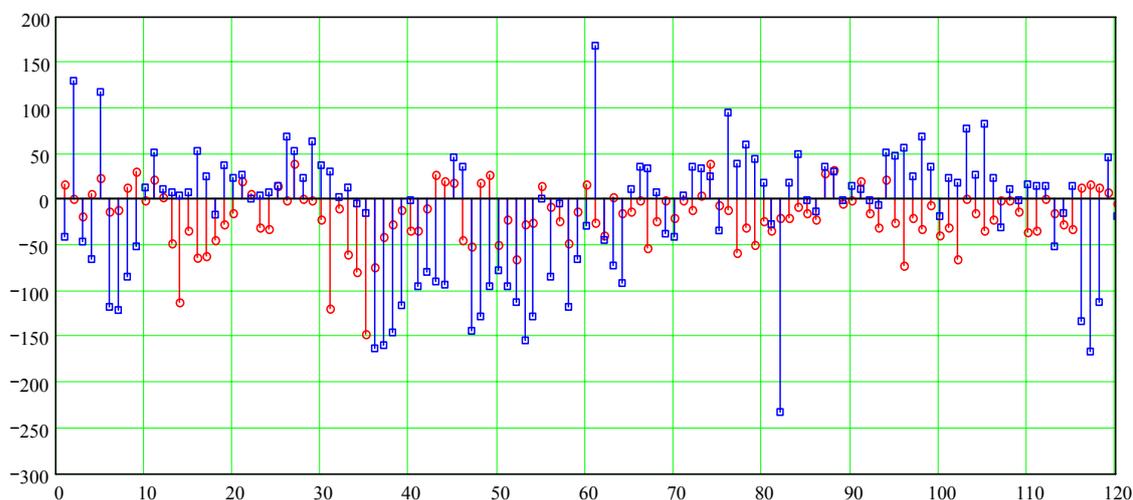


Рис.6: Усредненные величины (в секундах) углов измеренных завалов магнитных блоков: \circ -- измерения 1983 года, \square – измерения 2004 года.

Нам пока не ясно насколько такие мелкомасштабные, в пределах одного блока, возмущения существенны для динамики спинового движения. Если это так, то придется дополнительно проводить юстировку и пакетов.

Таким образом к настоящему времени мы имеем следующую ситуацию.

- Вертикальное смещение магнитных блоков от проектного положения распределено в интервале приблизительно от -6 мм до $+2.5$ мм, что почти на порядок превышает величину, допустимую с точки зрения устойчивости спинового движения. Но этот разброс, как было уже отмечено раньше, в принципе может быть устранен до требуемого уровня.
- К сожалению нет “свежих” данных о сезонных смещениях магнитных блоков после всего комплекса техногенных воздействий. Для устранения этой неопределенности необходимо в ближайшее время провести в течение одного года трехкратный цикл геодезических измерений положения магнитных блоков: в сентябре, январе и мае. Без этих измерений невозможно сделать заключение о геофизической пригодности территории нашего ускорителя, а значит и самого ускорителя, для создания комплекса ускорения поляризованных протонных пучков.

Коррекция вертикальной орбиты.

Причиной (источником) вертикальных искажений орбиты является косое дипольное поле ΔB_x , вызываемое вертикальными смещениями $\delta\zeta$ магнитных блоков с градиентом поля G и их поворотами на углы $\delta\varphi$:

$$\frac{\Delta B_x}{B_0} = -\frac{G}{B_0} \cdot \delta\zeta + \delta\varphi \cong \mp 2.3 \times 10^{-3} \cdot \frac{\delta\zeta}{\text{мм}} + \delta\varphi ,$$

В У70 случайные смещения с rms $\langle \delta\zeta \rangle = 0.1$ мм \Rightarrow $|\delta y|_{\text{max}} \in [0, 6.2]$ мм
с вероятностью 95%.

Выполнение требования $|\delta y|_{\text{max}} \leq 0.5$ мм в настоящее время невозможно по двум причинам:

- из-за недостаточной полноты и точности системы измерения искажений орбиты,
- из-за структуры существующей системы гармонической коррекции косого дипольного поля.

Планировалась система из 60 датчиков, расположенных на краях магнитных блоков приблизительно равномерно по кольцу через каждые два блока. В настоящее время имеются 55 датчиков, отсутствуют датчики специальной конструкции для камер в блоках головных частей каналов.

Таким образом, для ускорения поляризованных протонов в У70 необходимо:

- привести в порядок существующую систему измерения орбиты,
- изготовить и установить в кольцо недостающие датчики,
- обеспечить rms точность измерения орбиты на уровне не хуже $\langle \delta y \rangle \approx 0.1$ мм.

Существующая в У70 система коррекции:

- гармонический тип коррекции,
- компенсирует только одну 10-ую азимутальную гармонику орбиты,
- две цепи (“cos” и “sin”) последовательно соединенных дипольных корректирующих обмоток, размещенных соответственно на 16 F- и 12 D- блоках,
- система коррекции эффективна только в диапазоне частот $9.8 < Q_y < 10$,
- максимальные остаточные искажения орбиты не менее $7 \div 8$ мм (для данных измерений 2004 года).

Каждая дипольная корректирующая обмотка представляет собой специально подобранный набор из последовательно соединенных проводников, расположенных на полюсах магнитного блока и обеспечивающих возбуждение косого поля:

$$\Delta B_x = k \cdot I , \quad \text{где: } k \approx 0.295 \text{ Гс/А, } I - \text{ток питания корректирующей обмотки.}$$

Смещение блока $\delta\zeta = 1$ мм требует для компенсации косого поля ток $I = 92$ А в корректирующей обмотке при поле $B_0 = 12$ кГс.

Максимально допустимый ток в корректирующих обмотках – не более 200 А. В настоящее время корректирующие обмотки имеются в 29 D- и в 42 F-блоках.

Предпочтительно использовать обмотки, расположенные в D-блоках: требуются токи питания меньшей величины.

Численное моделирование:

- подавление вертикальных искажений орбиты до уровня долей мм может обеспечить только система независимо питаемых обмоток, достаточно равномерно распределенных по кольцу ускорителя;
- для определения токов в корректирующих обмотках могут быть использованы различные алгоритмы минимизации вектора остаточных искажений, состоящего из показаний, наблюдаемых во всех датчиках.

Для оценки возможностей новой системы коррекции в У70 было проведено предварительное моделирование процесса коррекции с использованием пока простейшего алгоритма, сводящего к минимуму евклидову норму вектора искажений. Результаты такого моделирования приведены в Таблице 1, где:

N_{cor} – номера блоков с возможным размещением корректирующих обмоток;

$\langle \zeta \rangle$ – означает среднеквадратичную точность юстировки магнитных блоков [мм];

$|\zeta|_{\text{max}}$ – предельное смещение блоков от идеальной плоскости [мм];

$\langle \delta y \rangle$ – среднеквадратичную точность измерения положения орбиты в датчиках [мм];

$|y|_{\text{max}}^{\text{ring}}$ – максимальное (по всему кольцу ускорителя) искажение откорректированной орбиты относительно идеального положения [мм];

$|y|_{\text{max}}^{\text{BPM}}$ – максимальное искажение откорректированной орбиты в датчиках;

I_{max} – максимальный ток в корректирующих катушках [А];

КО – корректирующая обмотка;

Приведенные в таблице численные значения для случайных величин $|y|_{\text{max}}^{\text{ring}}$, $|y|_{\text{max}}^{\text{BPM}}$, I_{max} соответствуют уровню 95% достоверности при 100 испытаниях.

Из приведенной таблицы видно, что наилучшим образом удовлетворяет требованиям к скорректированной орбите вариант 4, когда предполагается разместить корректирующие обмотки во всех D-блоках. В этом варианте при приемлемых требованиях к юстировке получаются удовлетворительные значения остаточной орбиты: менее 0.93 мм по всему кольцу и менее 0.53 мм по показаниям в датчиках. Но такой вариант потребует пересмотра и переделки всех систем коррекции, имеющихся в магнитной структуре У70. Но если эксперименты с поляризованными пучками будут продолжаться достаточно длительное время, то на такую переделку систем коррекции можно решиться. Учитывая небольшую интенсивность поляризованных пучков можно будет обойтись без систем коррекции многих резонансов, а освобожденные полюсные проводники использовать для создания недостающих корректирующих обмоток в D-блоках. Конечно, переход к экспериментам с интенсивными пучками потребует возврата к исходной структуре систем коррекции.

Мы пока останавливаемся на варианте 7, когда используются только блоки с существующими в них обмотками коррекции вертикальной орбиты. Этот вариант кажется более перспективным для дальнейшей проработки:

- после надежной юстировки и достаточно точных измерений орбиты можно будет использовать алгоритм MICADO для выбора наиболее эффективных корректирующих блоков для коррекции существующей орбиты,
- возможно удастся "вручную" бамповый способом подавить локально большие остаточные искажения орбиты.

Таблица 1:

	N_{cor}	$\langle \zeta \rangle$	$ \zeta _{\text{max}}$	$\langle \delta y \rangle$	$ y _{\text{max}}^{\text{ring}}$	$ y _{\text{max}}^{\text{BPM}}$	I_{max}
1	Все 60 дефокусирующих магнитных блока У70	0.50	1.50	0.00	2.16	0.00	231
2	—//—	0.50	1.00	0.00	1.98	0.00	187
3	—//—	0.25	0.50	0.00	0.99	0.00	93
4	—//—	0.25	0.50	0.10	0.93	0.53	99
5	—//—	0.10	0.20	0.00	0.40	0.00	37
6	—//—	0.10	0.20	0.10	0.64	0.46	51
7	Все 29 дефок блока с КО и все 16 фок блоков коррекции 10-гармоники	0.25	0.50	0.10	1.66	1.01	255
8	—//—	0.10	0.20	0.00	0.63	0.42	96