

СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ АН СССР
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

М.М.Бровин, А.А.Жоленц, Е.Н.Загородников,
Э.А.Купер, В.Н.Литвиненко, А.С.Медведко,
С.И.Мишнев, С.А.Никитин, И.Я.Протопопов
Г.М.Тумайкин

КОРРЕКЦИЯ ЗАМКНУТОЙ ОРБИТЫ В
ЭЛЕКТРОН - ПОЗИТРОННОМ НАКОПИ-
ТЕЛЕ ВЭПП - 4

ПРЕПРИН 80 - 207



КОРРЕКЦИЯ ЗАМКНУТОЙ ОРБИТЫ В ЭЛЕКТРОН-ПОЗИТРОННОМ НАКО-
ПИТЕЛЕ ВЭП-4

М.М.Бровин, А.А.Жоленц, Е.Н.Загородников, Э.А.Купер,
В.Н.Литвиненко, А.С.Медведко, С.И.Мишнев, С.А.Никитин,
И.Я.Протопопов, Г.М.Тумайкин

А Н Н О Т А Ц И Я

Приводятся данные по системе дипольных корректоров орбиты ВЭП-4, касающиеся их состава, размещения в кольце накопителя, организации питания и управления от ЭВМ. Рассмотрены различные методы, используемые на ВЭП-4 для расчета корректирующего воздействия с целью компенсации искажений замкнутой орбиты. Сообщаются сведения по организации программ, реализующих эти методы. Представлены экспериментальные результаты коррекции орбиты на ВЭП-4.

В работе описаны аппаратура и методы коррекции равновесной орбиты на накопителе ВЭШ-4. Накопитель содержит около 200 основных элементов (поворотных магнитов и квадрупольных линз /1/, ошибки в изготовлении и выставке которых могут создавать дипольные возмущения, приводящие к искажению равновесной орбиты. Система коррекции орбиты состоит из электростатических датчиков положения пучка, корректоров по X - и Z - направлениям и набора вычислительных и управляющих программ. 53 датчика измеряют орбиту с погрешностью около 0,15 мм /2/. Для управления орбитой служат 50 X -корректоров и 53 Z -корректора. Таким образом, на длину волны бетатронных колебаний ($\nu_x \approx \nu_z = 9.2$) приходится около 6 точек наблюдения и столько же корректоров по каждому из направлений.

Коррекция орбиты на ВЭШ-4 осуществляется двумя способами — локальной и общей коррекции. При локальной коррекции орбита выправляется на выделенном участке, оставаясь без изменений на всей остальной части кольца. Общая коррекция основана на уменьшении среднеквадратичного отклонения орбиты от идеальной по всему накопителю.

Методы коррекции орбиты .

Способ локальной коррекции применяется для устранения остаточных искажений орбиты после проведения общей коррекции; для регулировки орбиты в местах инжекции пучков при настройке захвата частиц в накопитель; для подвижки орбиты в местах встречи с целью улучшения фоновых условий эксперимента.

Локальная коррекция осуществляется выбранной комбинацией 3-х корректоров. Корректоры создают локальное искажение орбиты, характеризуемое величиной d — максимальным отклонением орбиты от исходной на участке действия "тройки". Расчет требуемых токов в обмотках корректоров для заданной величины d

по данным о магнитной структуре накопителя и введение искажения производится управляющей ЭВМ. Достижимый предел по d определяется размерами камеры на данном участке, предельной силой корректоров и составляет в разных местах накопителя 1-4 см. Точность, с которой искажение локализовано, можно охарактеризовать отношением максимального отклонения орбиты от исходной вне участка действия "тройки" к параметру d . На ВЭШ-4 это отношение меньше 10%. На рис.1 показан экспериментальный результат действия одной из "троек" по Z -направлению. Изображены одновременно несколько орбит, соответствующих разным по величине и знаку d . Снимок сделан с экрана графического дисплея.

Локальная коррекция орбиты применялась также для измерений свободной апертуры накопителя. В этих экспериментах намеренно создавались большие локальные искажения орбиты, приводящие к резкому ухудшению времени жизни пучка и его гибели. Сумма пороговых значений d , найденных по измерениям в обе стороны от равновесного положения орбиты, давала представление о величине свободной апертуры на данном участке накопителя, а последовательный перебор различных троек корректоров - об апертуре во всем кольце. Таким путем были найдены места механических ограничений апертуры на 10-30%.

Для общей коррекции орбиты применен известный метод /3,4/, основанный на минимизации функции цели

$$\Psi = (X + AD)^T(X + AD) + q^2 D^T D \quad (1)$$

где $X = \{X_i\}$ - вектор отклонений орбиты в M точках наблюдения. $D = \{D_{ij}\}$ - вектор N корректирующих воздействий (углы дефлексии или токи в обмотках корректоров), A - матрица $M \times N$, связывающая единичное воздействие каждого из корректоров с отклонениями орбиты в точках наблюдения, q^2 - параметр ограничения силы корректоров, τ - знак транспонирования. Вектор X - результат измерения орбиты. В реализованном на ВЭШ-4 варианте метода общей коррекции орбиты матрица A может быть либо рассчитана по известным параметрам

магнитной структуры, либо непосредственно измерена. Из условия минимума Ψ легко получить уравнение:

$$(A^T A + q^2 E) D = -A^T X \quad (2)$$

(E - единичная матрица), откуда имеем решение:

$$D = -(A^T A + q^2 E)^{-1} A^T X \quad (3)$$

В реальных условиях вследствие неизбежных ошибок в X и особенно в A решение (3) также содержит погрешности. Это приводит к необходимости корректировать орбиту последовательными итерациями. В определенных случаях эти итерации могут расходиться, т.е. величина $X^T X$ вместо того, чтобы уменьшаться, будет расти. Общей характеристикой системы уравнений (2) при $q^2 = 0$ с точки зрения практической ценности получаемого решения в условиях помех может служить мера обусловленности $\rho = \frac{\lambda_{\max}}{\lambda_{\min}}$ матрицы $W = A^T A$ ($\lambda_{\max}, \lambda_{\min}$ - максимальное и минимальное собственные числа W) /7/. Системы с плохо обусловленными матрицами ($\rho \gg 1$), как правило, дают решение с очень большими ошибками. Для ВЭШ-4 ρ довольно велика $\sim 10^5 + 10^6$. Поэтому для обеспечения сходимости итераций при коррекции орбиты нами были применены методы регуляризации плохо обусловленных матриц /5/.

Первый метод связан с введением в функцию цели члена $q^2 D^T D$. Решение (3) находится через обращение матрицы $A^T A + q^2 E$. При этом выбором $q^2 > 0$ можно, во-первых, исключить появление в решении нереально больших значений D_i , и, во-вторых, обеспечить сходимость итераций /6/. Оптимальный в смысле скорости сходимости и нужного ограничения силы корректоров выбор q^2 удобнее всего делать опытным путем. Иллюстрацией этому могут служить зависимости (рис.2 и 3а), экспериментально измеренные на ВЭШ-4. На рис.2 изображена зависимость максимального требуемого тока в корректорах от параметра q^2 . Кривые R_1 и R_2 (рис.3а) показывают, во сколько раз уменьшаются средний квадрат и максимальное значение искажений орбиты после одной итерации при разных q^2 .

Во втором методе регуляризации решение (3) находится в

виде линейной комбинации собственных векторов $U_k (k=1, N)$ симметричной матрицы $W = A^T A$:

$$D = \sum_{k=1}^N c_k U_k \quad (4)$$

с коэффициентами

$$c_k = (U_k^T \cdot A^T X) / (\lambda_k + q^2) \quad (5)$$

Собственные числа λ_k матрицы W вещественны и положительны в силу свойств W . Представление (4) удобно тем, что позволяет исключить из решения собственные векторы, соответствующие малым λ_k . Обоснованием этому могут служить следующие соображения. Во-первых, векторы с малыми λ_k слабо воздействуют на орбиту. Это можно увидеть, если результат независимого воздействия на орбиту вектора U_k выразить величиной $X_k^T X_k$:

$$X_k^T X_k = (A U_k)^T A U_k = \lambda_k$$

(использованы свойства $U_k^T U_k = 1$, $W U_k = \lambda_k U_k$). Во-вторых, именно с малыми λ_k (при $q^2 = 0$) связано резкое усиление ошибок в решении и появление нереально больших D_i /5/. Таким образом, используя первые $N_\lambda < N$ собственных векторов, отвечающих последовательности $\lambda_1 > \lambda_2 > \dots > \lambda_{N_\lambda}$, можно обеспечить сходимость итераций. На рис.3б, как и на рис.3а, изображена экспериментальная зависимость качества коррекции только уже от параметра N_λ . Второй метод является, по сути, обобщением первого и переходит в него при $q^2 \neq 0$, $N_\lambda = N$. Как это видно из (5), эффект введения q^2 состоит в подавлении вклада малых λ_k начиная с некоторого. В представлении (4) можно комбинировать оба подхода, варьируя одновременно и q^2 и N_λ .

Аппаратура коррекции.

Корректоры в полукольцах ВЭШ-4 выполнены в виде дополнительных обмоток на полюсах поворотных магнитов. Обмотка радиальной коррекции размещена в плоской части магнита, вертикальной — на фокусирующем по Z -координате участке. Дипольные корректоры в прямолинейных промежутках накопителя выполнены в ви-

де автономных магнитов с соответствующей ориентацией полюсов. Эффективность X — корректоров 3 кГс см/А, Z — корректоров — 1 кГс см/А.

Питание корректоров индивидуальное и осуществляется от однотипных ($\pm 10A$, $15B$) каналов стабилизации тока. Конструктивно аппаратура стабилизации и управления размещена в унифицированных шкафах.

Каждый шкаф содержит по 56 каналов стабилизации, ЦАП, коммутатор аналоговых сигналов и АЦП (рис.4) ЦАП и АЦП шкафа связаны с ЭВМ через буферные ЗУ, имеющие по 64 (для ЦАП) и 128 (для АЦП) 12-ти разрядных слов. Раздача информации из ЗУ по каналам управления ведется непрерывно с периодом 20 мсек (300 мсек на канал). Входная емкость канала стабилизации запоминает поступившее от ЦАП напряжение и хранит его в течении периода раздачи. Выходными устройствами каналов управления служат усилители мощности с широтно-импульсной модуляцией сигналов /8/, имеющие КПД около 95%.

Измерительные шунты всех каналов шкафа присоединены к общей нулевой шине, что позволило вести однопроводные измерения. Сбор информации производится путем периодического подключения измеряемых каналов (шунтов, обмоток коррекции и вспомогательных контрольных точек) к АЦП с последующей передачей результатов измерений в ЗУ.

Суммарная погрешность измерения и управления каналами коррекции не превышает 0,5% от максимального значения тока (10А). Взаимодействие описанных блоков, имеющих автономный временный цикл, с управляющей ЭВМ осуществляется по командам соответствующих рабочих и тестовых программ.

Использование большого количества каналов коррекции потребовало ввести машинный контроль качества работы системы. Основной режим контроля, осуществляемый без потери пучка, состоит в проверке напряжений на шунтах и в сравнении результатов с заданием в ЦАП, хранящимся в ЭВМ. Более подробная, эксплуатационная проверка состоит в определении характеристик системы при выбранном оператором уровне рабочего тока. В этом режиме измеряются токи и напряжения на выходе каналов, вспомогательные пи-

такие напряжения, производится калибровка АЦП и контролируются "нули" каналов. Имеется возможность статистической обработки результатов измерений. ЭВМ анализирует задание и результаты измерений и предоставляет оператору информацию о режимах, о величинах их отклонений от нормы, сравнивает величины сопротивлений обмоток с табличными значениями.

В итоге оператор имеет заключение о работоспособности каналов или системы, а также версии возможных неисправностей.

З а к л ю ч е н и е.

В окончательном виде аппаратура и набор программ коррекции орбиты действуют с весны 1979 г. Аналогичная система используется на бустерном накопителе ВЭШ-3.

Измерение положения равновесной орбиты и расчет необходимого корректирующего воздействия проводятся непосредственно во время оперативной работы. Для получения уже достаточно хорошего результата, как правило, требуется несколько итераций, занимающих по времени ~ 5 мин. Так, например, на ВЭШ-4 орбита легко корректируется от величин среднеквадратичных искажений $\sqrt{x^2} \sim 1$ см до $\sqrt{x^2} \sim 0,1$ см. На рис.5 показана типичная орбита по x - и z - направлениям в ВЭШ-4 до (рис.5а) и после (рис.5б) проведения коррекции.

В режиме ускорения орбита выправлялась с помощью линейной интерполяции таблиц, созданных предварительным решением задачи коррекции на начальном и конечном уровне энергии.

Хорошая стабильность магнитных элементов накопителя при его стационарной работе позволяет обходиться без дополнительной коррекции орбиты в течение нескольких суток. Обычно необходимость в новой коррекции орбиты возникала при изменении теплового режима накопительного кольца. Имеющаяся система позволяла поддерживать состояние орбиты на уровне $\sqrt{x^2}$, $\sqrt{z^2} < 0,2$ см.

В заключение авторы приносят свою благодарность сотрудникам группы ВЭШ-4 за помощь в проведении экспериментов.

Л и т е р а т у р а

1. И.Я.Протопопов и др. Труды X международной конференции по ускорителям на высокие энергии. Протвино 1977 г., стр.421.
2. Е.Н.Дементьев и др. "Измерение равновесной орбиты пучка в электрон-позитронном накопителе ВЭШ-4". Труды VI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна 1978 г.
3. Y. Bessonier, CERN 65-35 (1965)
4. G. Guignard, CERN 70-24 (1974)
5. Н.С.Бахвалов "Численные методы", т.1, "Наука", М., 1979 г.
6. В.Н.Литвиненко "Коррекция равновесной орбиты в накопителях ВЭШ-3 и ВЭШ-4. Препринт ИЯФ 79-100, 1979 г.
7. Дж.Х.Уилкинсон "Алгебраическая проблема собственных значений", "Наука", М., 1970 г.
8. Е.И.Загородников, А.С.Медведко "Усилитель мощности с широтно-импульсной модуляцией", ПТЭ, № 6, 1978 г.

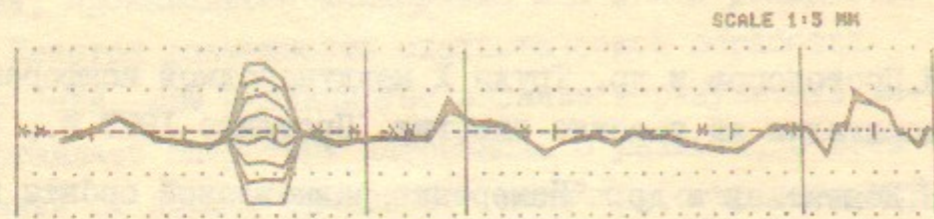


Рис.1 Действие "тройки" при разных величинах искажения (масштаб 1 : 5 мм).

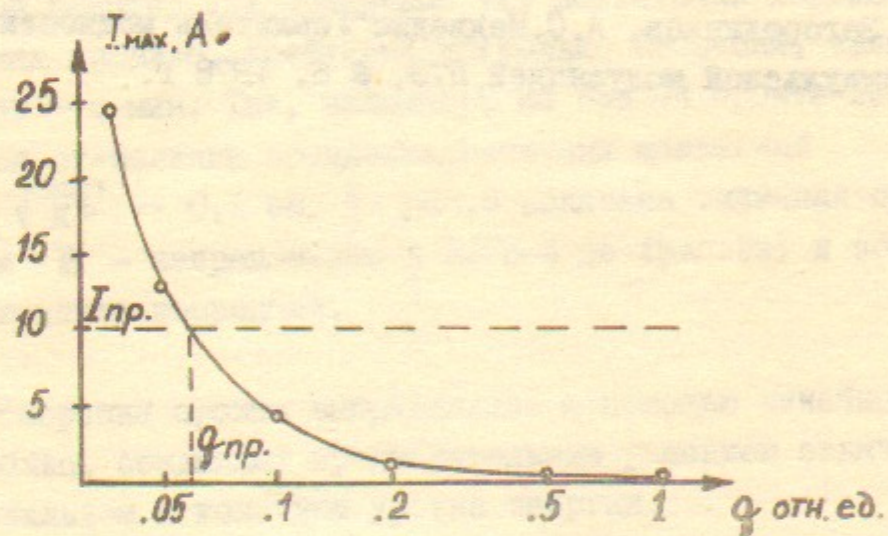


Рис.2 Зависимость максимального требуемого тока в корректорах от параметра q^2 .

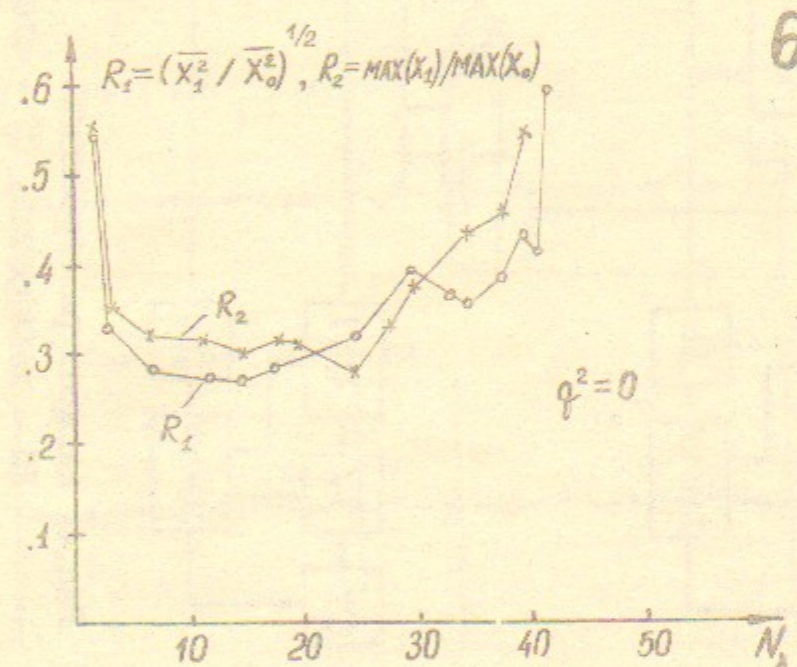
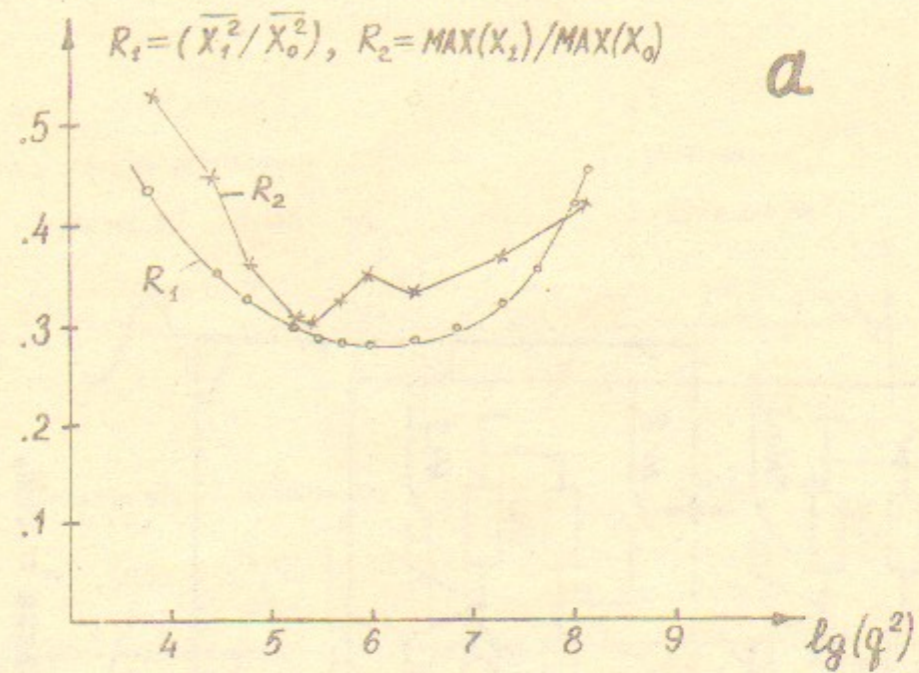


Рис.3 Зависимость относительного изменения характеристик орбиты (среднего квадрата и максимального значения искажений) после одной итерации от параметров q^2 (а) и N_λ (б).

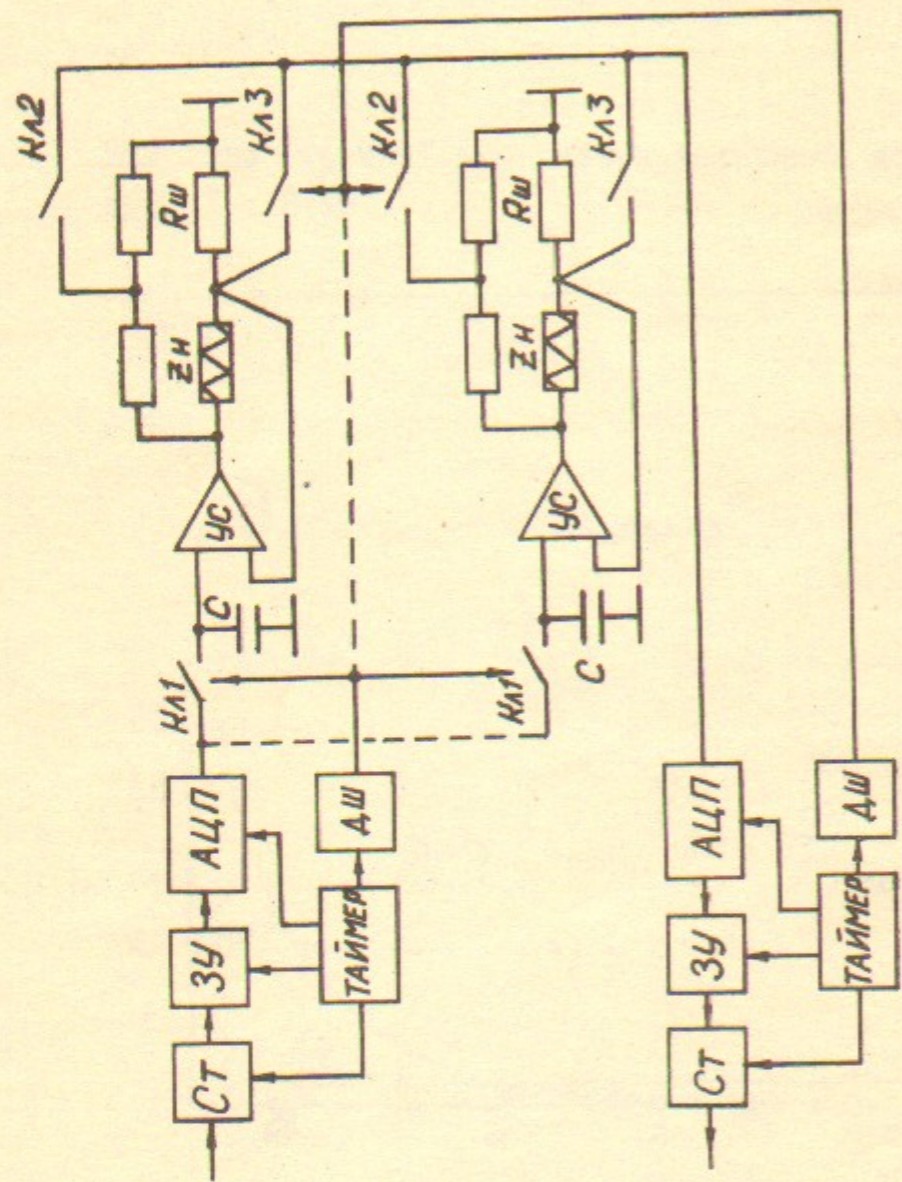


Рис. 4. Аппаратура коррекции.
 ДШ — дешифратор, СТ — станция связи с ЭВМ,
 ЗУ — цифровое запоминающее устройство.

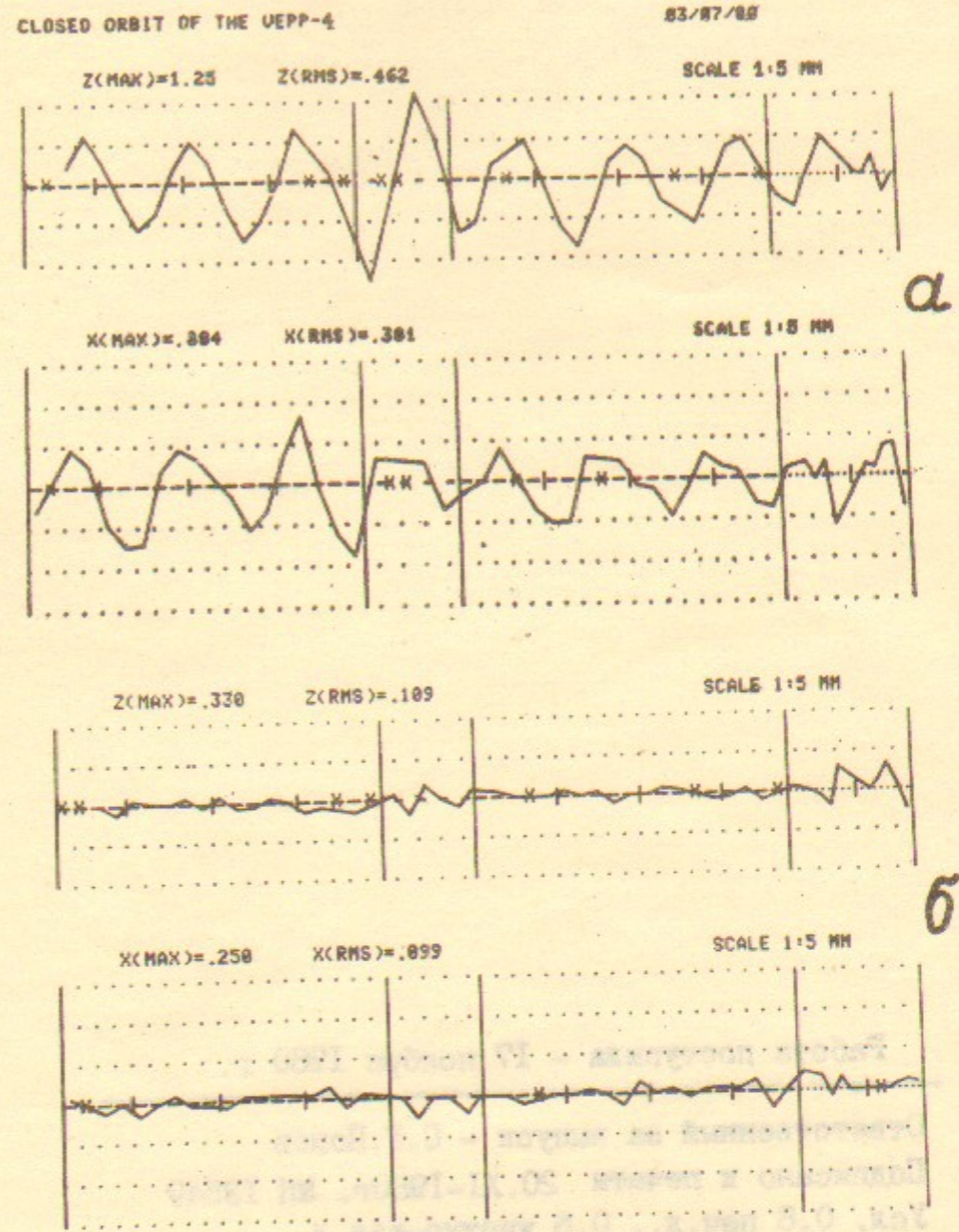


Рис. 5 Вид орбиты по Z и X — направлениям до (а) и после (б) проведения коррекции.