

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



С345e
Д-536

13/x-75

P9-9067

В.П.Дмитриевский, В.В.Кольга, Н.И.Полумордвинова

3969/2-75

ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БУСТЕРА
ПРОТОННОГО СИНХРОТРОНА
НА ЭНЕРГИЮ 70 ГЭВ

1975

P9 - 9067

В.П.Дмитриевский, В.В.Кольга, Н.И.Полумордвинова

ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БУСТЕРА
ПРОТОННОГО СИНХРОТРОНА
НА ЭНЕРГИЮ 70 ГЭВ

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

В настоящее время на протонном синхротроне ИФВЭ достигнута рабочая интенсивность $3,2 \cdot 10^{12}$ прот./имп. Ожидается, что при полном использовании возможностей ускорителя его интенсивность может быть доведена до $(4 + 5) \cdot 10^{12}$ прот./имп. Для того чтобы синхротрон ИФВЭ мог конкурировать с ускорителями NAL и CERN-2, его интенсивность необходимо повысить в десятки раз. Этого можно достичь в основном за счет увеличения числа частиц, ускоряемых в одном импульсе. В настоящее время разработан проект реконструкции синхротрона ИФВЭ, рассчитанный на получение интенсивности $5 \cdot 10^{13}$ прот./имп. ($\approx 10^{13}$ прот./с) /1/.

Так как основным ограничивающим фактором, определяющим число частиц в импульсе, является кулоновский сдвиг частоты некогерентных свободных колебаний, то единственной возможностью повышения интенсивности в десятки раз для данного ускорителя является увеличение энергии инжекции.

Проект реконструкции синхротрона ИФВЭ предусматривает создание инжекторного ускорителя - бустерного протонного синхротрона с частотой ускоряемых сгустков 25 Гц (быстрый бустер). Согласно проекту, быстрый бустер должен ускорять $1,7 \cdot 10^{12}$ прот./имп. от энергии 37,5 МэВ до энергии 1,5 ГэВ. В основной синхротрон ИФВЭ инжектируется из бустера в течение 1,2с. 30 импульсов протонов с энергией 1,5 ГэВ. Таким образом обеспечивается увеличение интенсивности до $5 \cdot 10^{13}$ прот./имп.

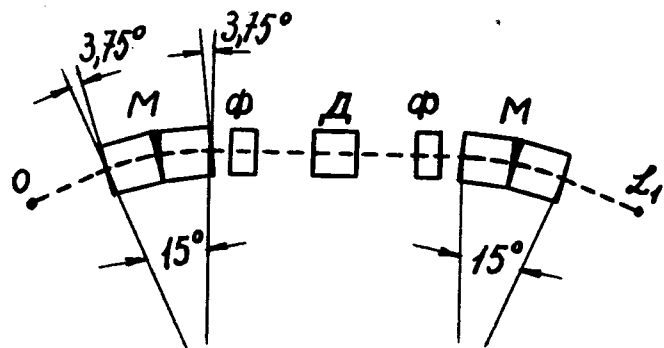


Рис. 1. Схема одного периода магнитной структуры бустера.

В качестве оптимальной магнитной структуры бустера в проекте принят вариант с разделенными функциями элементов магнитной структуры.

Магнитная система бустера состоит из 12 периодов с длинными прямолинейными промежутками между ними. Каждый период состоит из 2 поворотных магнитов с однородным полем, между которыми расположен триплет из 2 фокусирующих и одной дефокусирующей по радиусу квадрупольных линз. На рис. 1 приведена схема периода магнитной структуры бустера, а в табл. 1 перечислены основные параметры быстрого бустера ИФВЭ.

В настоящей работе изложены результаты численных расчетов динамических характеристик быстрого бустера. Проведен анализ полученных результатов и сравнение их с данными, приведенными в физическом обосновании проекта бустера.

1. Уравнения движения и методика численного расчета

В качестве независимой переменной в уравнениях движения принято расстояние вдоль равновесной орбиты s , x - нормальное отклонение от этой орбиты в медиан-

Таблица 1
Основные параметры бустера

Наименование параметров	Величина
Число элементов периодичности	12
Число поворотных магнитов	24
Число фокусирующих (по x) линз	24
Число дефокусирующих линз	12
Длина поворотного магнита по полю l_m	1,5 м
Длина фокусирующей линзы по град. l_ϕ	0,3331 м
Длина дефокусирующей линзы по град. l_d	0,5714 м
Длина большого промежутка l_0	2,0 м
Длина среднего промежутка l_2	0,7629 м
Длина малого промежутка l_1	0,250 м
Радиус кривизны расчетн. равновесн. орбиты R	5,730 м
Длина периода магнитной системы L_1	8,2636 м
Средний радиус орбиты	15,7823 м
Акцептанс: по радиусу	45 см.мрад
по вертикали	10 см.мрад
Поле инжекции в поворотных магнитах	1560 Э
Максимальное поле в поворотных магнитах	13102 Э
Минимальный градиент магнитного поля в линзах	127,0 Э/см
Максимальный градиент магнитного поля в линзах	1066,6 Э/см
Частота обращения частиц в начале цикла	0,83 МГц
Частота обращения частиц в конце цикла	2,79 МГц

ной плоскости, z - отклонение по вертикальной оси. В такой системе координат уравнения движения можно записать в виде

$$x'' - \frac{2kx'^2}{1+kx} - k(1+kx) = -\frac{1}{R_1} \sqrt{(1+kx)^2 + x'^2 + z'^2} \times$$

$$\times \left\{ \frac{(1+kx)^2 + x'^2}{1+kx} F_z - \frac{x'z'}{1+kx} F_x - z'F_s \right\}, \quad (1)$$

$$z'' - \frac{2kx'z'}{1+kx} = \frac{1}{R_1} \sqrt{(1+kx)^2 + x'^2 + z'^2} \times$$

$$\times \left\{ \frac{(1+kx)^2 + z'^2}{1+kx} F_x - \frac{x'z'}{1+kx} F_z - x'F_s \right\}, \quad (2)$$

где (')- обозначает $\frac{d}{ds}$, $k = \frac{1}{R}$ - кривизна равновесной орбиты, $R_1 = R \frac{p_1}{p_0}$ учитывает неравновесный импульс, F_z , F_x , F_s - компоненты магнитного поля элементов структуры.

Так как в проекте отсутствуют характеристики краевого поля магнитов и линз, то в первом приближении примем $F_s = 0$ и прямоугольное распределение по s .

В зависимости от элемента магнитной структуры данного периода (рис. 1) возможны 4 вида решений уравнений (1) и (2).

1). В прямолинейных промежутках l_0, l_1, l_2 :

$$x_i = x_{i-1} + x'_{i-1} \cdot l; \quad z_i = z_{i-1} + z'_{i-1} \cdot l; \quad (l_0, l_1 \text{ или } l_2).$$

$$x'_i = x'_{i-1}; \quad z'_i = z'_{i-1}.$$

2). На краях поворотных магнитов:

$$x_i = x_{i-1}; \quad x'_i = x'_{i-1} + k \cdot x_{i-1} \cdot \operatorname{tg} \alpha_1,$$

$$z_i = z_{i-1}; \quad z'_i = z'_{i-1} - k \cdot z_{i-1} \cdot \operatorname{tg} \alpha_1.$$

Каждый поворотный магнит состоит из двух прямоугольных пакетов и поворачивает орбиту на $\alpha = 15^\circ$, поэтому $\alpha = 0,25 \cdot \alpha = 3,75^\circ$.

3). Внутри поворотных магнитов решения уравнений (1) и (2) при

$$F_z = 1 + \Delta + \delta n \cdot k \cdot x + f_{\text{кв.}} \left(\frac{x}{A}\right)^2 + f_{\text{куб.}} \left(\frac{x}{A}\right)^3,$$

$$F_x = [\delta n \cdot k + 2f_{\text{кв.}} \cdot \frac{x}{A^2} + 3f_{\text{куб.}} \cdot \frac{x^2}{A^3}] \cdot z, \quad k = \frac{1}{R} = \frac{1}{573} \text{ см}^{-1},$$

где δn , $f_{\text{кв.}}$, $f_{\text{куб.}}$ - линейные, квадратичные и кубические отклонения магнитного поля от однородного, Δ - не зависящие от радиуса отклонения поля в поворотных магнитах, определяющие разброс уровней магнитного поля в различных периодах системы.

4). Внутри квадрупольных линз решения уравнений (1), (2) при

$$F_z = D \{ \delta_{0z} + (1 + \delta_1) x - \delta_2 \cdot z + \delta_6 \cdot x \cdot (5z^4 - 10x^2z^2 + x^4) \},$$

$$F_x = D \{ \delta_{0x} + (1 + \delta_1) z + \delta_2 \cdot x + \delta_6 \cdot x \cdot (5x^4 - 10x^2z^2 + z^4) \}.$$

$D = \frac{G}{H}$ - отношение градиента в линзах к полю в поворотных магнитах. $D = C_\phi$ - для фокусирующих (по x) линз, $D = C_d$ - для дефокусирующих. Для движения по равновесной орбите, как следует из табл. 1, $C_\phi = 0,08141 \text{ см}^{-1}$, $C_d = -0,8141 \text{ см}^{-1}$, δ_{0z} , δ_{0x} - смещение линз по радиусу и вертикали, соответственно; δ_1, δ_2 характеризуют повороты линз около продольной оси, если все линзы повернуты на угол $\bar{\phi}$, то $\delta_1 = -2\bar{\phi}^2$, $\delta_2 = -2\bar{\phi}$ в фокусирующих линзах и $\delta_1 = -2\bar{\phi}^2$, $\delta_2 = 2\bar{\phi}$ в дефокусирующих, δ_6 определяет искажение поля линз^{2/}.

Интегрирование системы (1), (2) производилось методом Робертсона при различном шаге, соответствующем 100 точкам на любом элементе периода структуры. Решения внутри отдельных элементов сопрягались между собой, исходя из условия непрерывности траектории и ее первой производной по s . Решение всей системы в течение одного оборота на ЭВМ БЭСМ-6 занимало

около 20 с. Начало отсчета выбрано в середине большого прямолинейного промежутка.

Отклонения поля и градиента в магнитах и линзах возможно задавать или в виде определенных зависимостей, или в виде набора случайных чисел с заданным распределением, моделируя тем самым как систематические, так и случайные статистически независимые возмущения параметров отдельных элементов магнитной системы. В последнем варианте используется стандартная программа квазислучайных чисел с нормальным распределением, средним значением, равным нулю и заданной среднеквадратичной ошибкой (σ). Так как выборка случайных чисел относительно невелика (12,24 или 36 на обороте), то система решалась для нескольких наборов (порядка 10-20) случайных чисел и определялись границы отклонений определенных параметров, зависящих от заданной погрешности. (См. Приложение 1).

2. Результаты расчетов для идеального поля

Вначале проведены расчеты основных параметров бустера для идеального магнитного поля ($\Delta = \delta n = f_{\text{КВ.}} = f_{\text{Куб.}} = \delta_{0x} = \delta_{0z} = \delta_1 = \delta_2 = \delta_6 = 0$). Частота свободных колебаний определялась по эллипсам методом совпадающих точек /3/.

а) Частоты свободных колебаний около равновесной орбиты ($R = 573$ см) при $x_0 = 0,5$ см; $x'_0 = 0$; $z_0 = 0,5$ см; $z'_0 = 0$

$$Q_r = 3,8526; \quad Q_z = 3,8012.$$

Без краевой фокусировки $Q_r = 4,0524$; $Q_z = 3,6268$.

б) Орбита для неравновесного импульса ($x_0 = 1,09$ см; $x'_0 = 0$; $\frac{\Delta p}{p} = 0,01$; $x_0 = -1,07$ см; $x'_0 = 0$; $\frac{\Delta p}{p} = -0,01$). ψ - функция совпадает с приведенной в проекте.

$$\left(\frac{\Delta R}{\Delta p/p}\right) = 1,15 \text{ м}; \quad \left(\frac{\Delta R}{\Delta p/p}\right)_{\text{max}} = 1,34 \text{ м}.$$

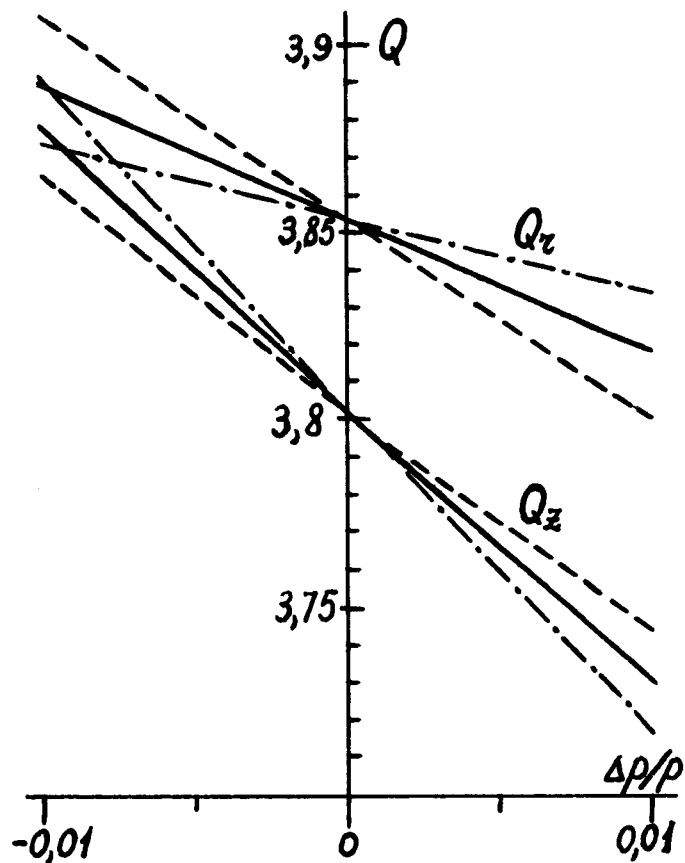


Рис. 2. Зависимость частот свободных колебаний от импульса. — $f_{\text{КВ.}} = 0$; --- $f_{\text{КВ.}} = -2 \cdot 10^{-3}$; -.- $f_{\text{КВ.}} = 2 \cdot 10^{-3}$.

в). Частоты свободных колебаний около орбиты с неравновесным импульсом. Зависимость Q_r , Q_z от $\frac{\Delta p}{p}$ приведены на рис. 2. Приблизительно можно принять

$$\frac{\partial Q_r}{\partial(\Delta p/p)} = -3,575; \quad \frac{\partial Q_z}{\partial(\Delta p/p)} = -7,36.$$

Как видно из рис. 2, для орбит с неравновесным импульсом, т.е. при фазовых колебаниях, разделение частот существенно изменяется от 0,08 при $\frac{\Delta p}{p} = 0,7 \cdot 10^{-2}$ до 0,023 при $\frac{\Delta p}{p} = -0,7 \cdot 10^{-2}$.

г). Частоты свободных колебаний около равновесной орбиты при изменении отношения градиента в линзах к полю в поворотных магнитах ($\partial [G/H] = \pm 0,001$).

При изменении градиента во всех фокусирующих линзах:

$$\left(\frac{\partial Q_r}{\partial G/H}\right)_f = 60,4 \text{ см}; \quad \left(\frac{\partial Q_z}{\partial G/H}\right)_f = -67,9 \text{ см}.$$

При изменении градиента во всех дефокусирующих линзах:

$$\left(\frac{\partial Q}{\partial G/H}\right)_d = -23,6 \text{ см}; \quad \left(\frac{\partial Q}{\partial G/H}\right)_d = 154,5 \text{ см}.$$

д). Частоты свободных колебаний около равновесной орбиты при изменении длины линз вдоль орбиты.

При этом линза удлиняется или укорачивается симметрично относительно середины. Соответственно изменяются длины коротких прямолинейных промежутков с тем, чтобы длина периода осталась неизменной.

При изменении длины всех фокусирующих линз:

$$\left(\frac{\partial Q_r}{\partial \ell}\right)_f = 0,0575 \text{ см}^{-1}; \quad \left(\frac{\partial Q_z}{\partial \ell}\right)_f = -0,0679 \text{ см}^{-1}.$$

При изменении длины всех дефокусирующих линз:

$$\left(\frac{\partial Q_r}{\partial \ell}\right)_d = -0,0385 \text{ см}^{-1}; \quad \left(\frac{\partial Q_z}{\partial \ell}\right)_d = 0,21 \text{ см}^{-1}.$$

е). Определение коэффициента расширения орбит.

Для этого одновременно с интегрированием системы

$$(1), (2) \text{ решалось уравнение } \frac{dL}{ds} = \sqrt{(1+kx)^2 + x'^2}, \text{ где}$$

$$k = 1/573 \text{ см}^{-1} \text{ в поворотных магнитах и } k = 0$$

в линзах. В прямолинейных промежутках $\Delta L_i = \ell \sqrt{1+x'_{i-1}^2}$.

Расчет $a = \frac{p}{L} \frac{dL}{dp}$ проведен при $\frac{\Delta p}{p} = \pm 0,01$ и начальных условиях, соответствующих данной орбите. В результате получено $a = 0,07316$ ($W_{кр.} = 2,53 \text{ ГэВ}$).

3. Результаты расчетов при введении систематических квадратичных нелинейностей и поворотов линз

Проведено исследование влияния постоянной квадратичной нелинейности магнитного поля поворотных магнитов на частоты свободных колебаний для частиц с неравновесным импульсом.

Во всех поворотных магнитах введена постоянная квадратичная нелинейность $f_{кв.} = \pm 2 \cdot 10^{-3}$ на расстоянии $A = 8 \text{ см}$ от равновесной орбиты. Результаты расчета при $\frac{\Delta p}{p} = \pm 0,01$ приведены на рис. 2. Видно, что отрицательная квадратичная нелинейность, т.е. спадающее по обе стороны от орбиты магнитное поле в поворотных магнитах существенно уменьшает зависимость разделения частот от импульса частиц.

Если аппроксимировать график рис. 2 линейной зависимостью, то можно найти

$$\begin{aligned} Q_r &= Q_{r0} + [-3,575 + 842,5 f_{кв.}] \cdot \frac{\Delta p}{p}, \\ Q_z &= Q_{z0} + [-7,36 - 770 \cdot f_{кв.}] \cdot \frac{\Delta p}{p}. \end{aligned} \quad (3)$$

Повороты квадрупольных линз около продольной оси вызывают связь свободных колебаний вследствие близости частот Q_r , Q_z , причем наибольший эффект возникает при наличии средней составляющей в угле поворота всех триплетов. Проведен расчет для нескольких значений среднего угла поворота триплетов и различных амплитуд свободных колебаний.

На рис. 3 изображена фазовая плоскость для середины дефокусирующей линзы (центр триплета) при $\bar{\phi} = 0,01$ и $x_0 = 1 \text{ см}$, $x'_0 = 0$, $z_0 = 1 \text{ см}$, $z'_0 = 0$.

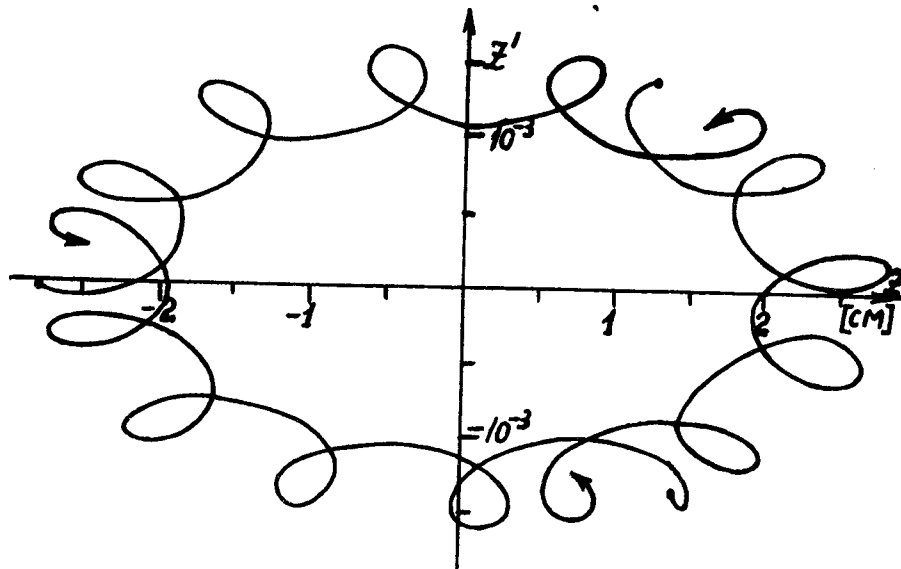


Рис. 3. Аксиальная фазовая плоскость для середины триплета при повороте всех триплетов около продольной оси на угол $\bar{\phi} = 0,01$ рад, $\frac{\Delta p}{p} = 0$.

Гармоники угла поворота практически не оказывают влияния на связь колебаний.

4. Расчет влияния статистических ошибок в значениях параметров бустера

а). Влияние статистических ошибок в однородном поле поворотных магнитов (Δ).

Параметр Δ задается в виде случайного числа для каждого поворотного магнита (программа выдает набор из 24 псевдослучайных чисел). В результате решения системы (1), (2) при $x_0 = x'_0 = z_0 = z'_0 = 0$ в течение

10 оборотов, находится искаженная орбита. Затем программа выдает новый набор 24 случайных чисел с той же среднеквадратичной ошибкой генеральной совокупности, и расчет повторяется. На рис. 4 приведены гистограммы отклонений орбиты для середины фокусирующей линзы каждого периода при пяти наборах случайных чисел. В этом расчете величина среднеквадратичной ошибки соответствует проектному значению $\sigma_{\Delta} = 5 \cdot 10^{-4}$. Из рис. 4 видно, что максимальное отклонение орбиты в зависимости от набора колеблется между 0,5 см и 1,45 см. Такой разброс в величине искажений орбиты связан с тем, что в сильнофокусирующем ускорителе основное влияние на орбиты оказывает соответствующая резонансная гармоника отклонений поля. Для бустера ($Q \approx 3,8$) такой гармоникой является четвертая.

На рис. 5 приведена гистограмма полной амплитуды 4-й гармоники a_4 при $\sigma = 1$ в зависимости от набора (цифрой на гистограмме обозначен его номер) для 30 наборов. Если сравнить амплитуды гармоник с отклонениями орбиты (рис. 4) для одинаковых наборов, то видна четкая корреляция между ними.

Так как наиболее вероятное значение амплитуд гармоник соответствует 2,4 наборам, то наименее вероятное отклонение орбиты будет составлять $0,6 + 0,7$ см.

б). Влияние статистических ошибок в поперечном смещении квадрупольных линз (δ_{0x}, δ_{0z}).

δ_{0x} , соответствующая вертикальному смещению линз, задавалась в виде набора 12 случайных чисел (смещение триплета как целого) и 36 случайных чисел (смещение отдельных линз независимо) при среднеквадратичной ошибке, равной $\sigma_{\delta_{0x}} = 0,01$ см и 0,05 см.

Из соответствующих гистограмм можно найти, что для $\sigma = 0,01$ см максимальное отклонение орбиты в вертикальном направлении в центре триплета колеблется от 0,11 до 0,35 см при смещении триплетов как целого, и от 0,4 до 1,24 см при смещении квадрупольных линз как независимых элементов. В зависимости от набора, искажения орбиты различаются примерно на тот же коэффициент, что и при статистических ошибках в поле поворотных магнитов.

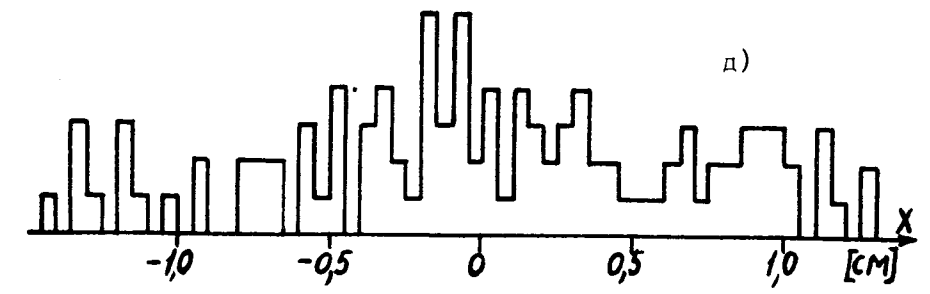
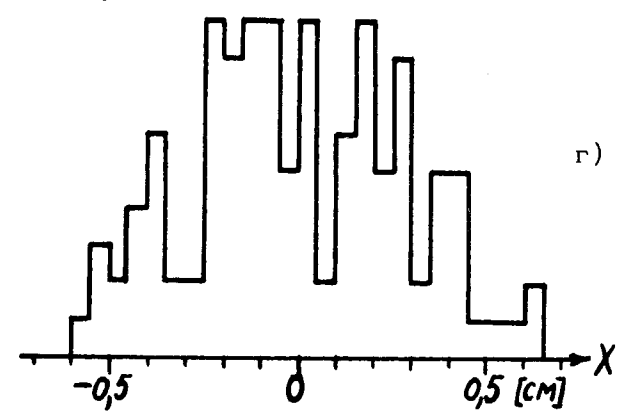
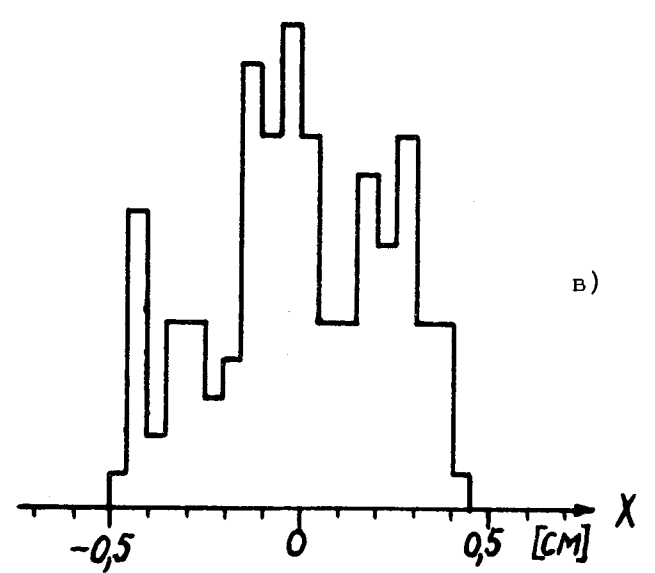
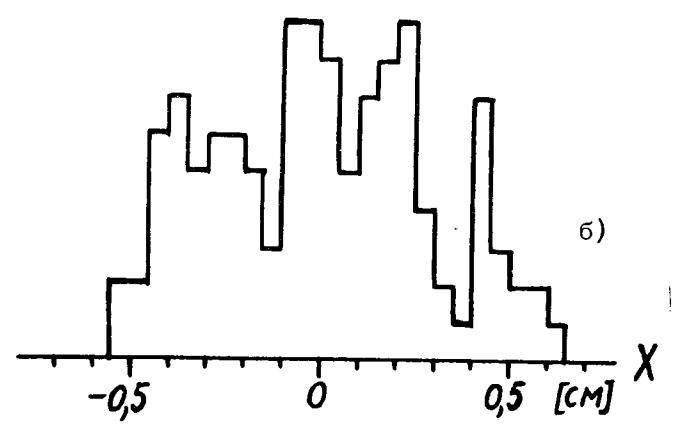
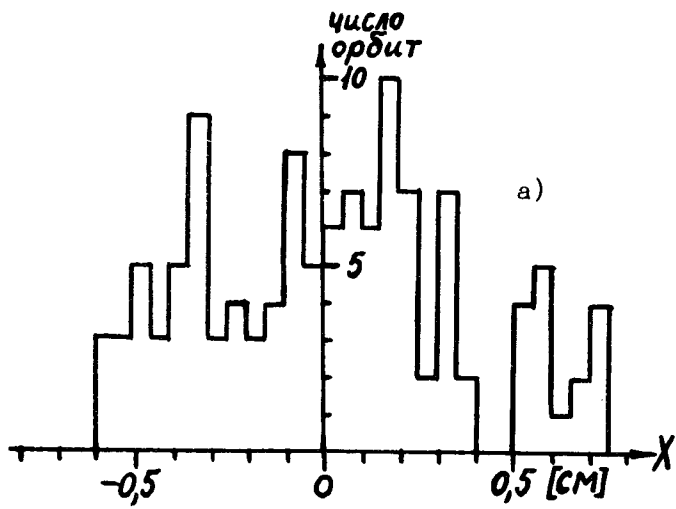


Рис. 4. Гистограммы распределений отклонений орбит при наличии случайных ошибок в поле поворотных магнитов для разных наборов случайных чисел: а) 1-й набор, б) 2-ой набор, в) 3-й набор, г) 4-й набор, д) 5-й набор.

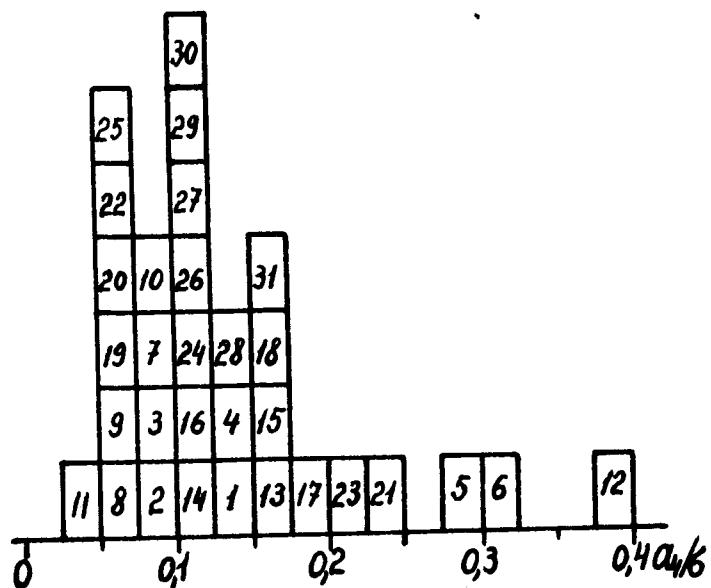


Рис. 5. Гистограмма распределения амплитуды 4-й гармоники при различных случайных выборках (объем выборки 24 числа).

Горизонтальное смещение квадрупольных линз приводит приблизительно к таким же радиальным искажениям орбиты, что и вертикальное. В этом случае $\delta_{\theta z}$ задавалось в виде набора 12 или 36 случайных чисел со среднеквадратичной ошибкой $\sigma_{\delta_{\theta z}} = 0,01$ и $0,05$ см. Из этих расчетов видно, что если рассматривать смещение триплета как целого, то допуск на среднеквадратичное отклонение может быть несколько смягчен.

На рис. 6 приведена гистограмма отклонений орбиты в медианной плоскости при одновременном действии ошибок поля в поворотных магнитах ($\sigma_{\Delta} = 5 \cdot 10^{-4}$) и радиальных смещений триплетов ($\sigma_{\delta_{\theta z}} = 0,01$ см) для набора, соответствующего наивероятному значению 4 гармоники.

в). Влияние статистической линейной добавки в магнитном поле поворотных магнитов.

δ_n задавалась в виде набора 24 случайных чисел с различной среднеквадратичной ошибкой σ_{δ_n} .

При начальных условиях $x_0 = 0,5$ см; $x'_0 = 0$; $z_0 = 0,5$ см; $z'_0 = 0$ находились фазовые эллипсы. Наблюдалось статистическое уширение фазовых эллипсов из-за расширения полос параметрических резонансов.

На рис. 7 приведен вертикальный эллипс для середины триплета при $\sigma_{\delta_n} = 0,5$. По-видимому, это значение является допуском на возможную линейную добавку в магнитном поле поворотных магнитов. При $\sigma_{\delta_n} = 1,0$ фазовый эллипс существенно искажается.

Был проведен расчет влияния статистически распределенных поворотов триплетов. Существенного влияния

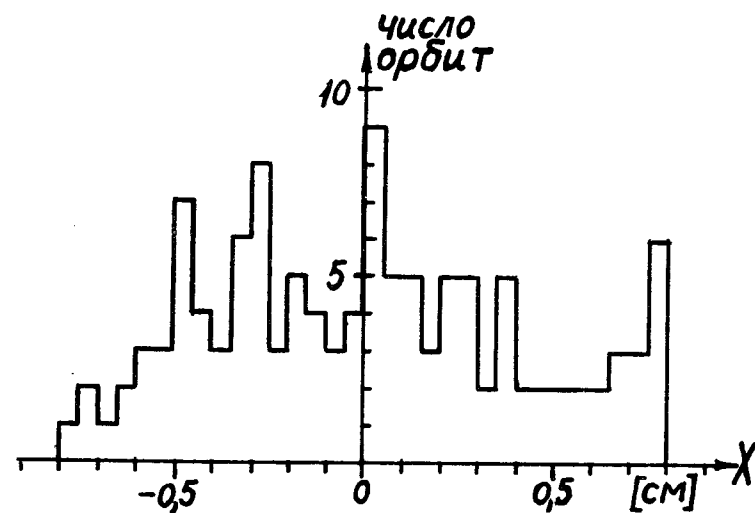


Рис. 6. Гистограмма распределения отклонений орбиты при наличии случайных ошибок в поле поворотных магнитов и в горизонтальной установке триплетов.

Заключение

Проведенные численные исследования динамических характеристик бустера ИФВЭ позволяют сделать заключение об оптимальном выборе значений основных параметров бустерного синхротрона. Влияние краевой аксиальной фокусировки в поворотных магнитах приводит к уменьшению величины разделения частот свободных колебаний. Зависимость разделения частот от импульса (при фазовых колебаниях) можно уменьшить, если ввести отрицательную квадратичную нелинейность в поле поворотных магнитов. Расчет влияния статистических отклонений параметров на поведение орбиты позволил определить функцию распределения резонансной гармоники при различных случайных выборках и найти наиболее вероятное искажение орбиты и его дисперсию при заданном среднеквадратичном значении отклонений параметров.

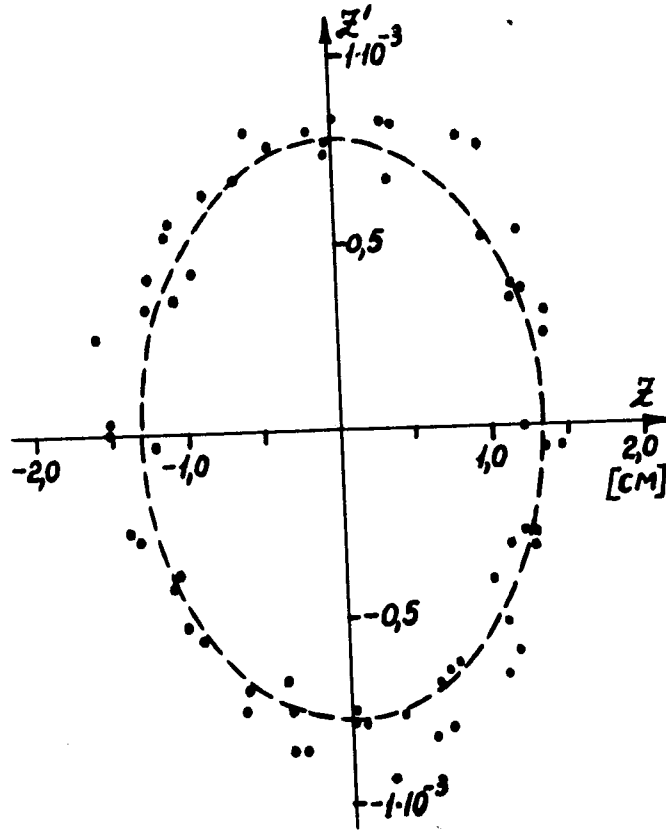


Рис. 7. Аксиальная фазовая плоскость для середины триплета при статистическом градиенте в поле поворотных магнитов.

на связь колебаний не обнаружено. В основном влияет средняя компонента поворотов линз, допуск на которую, как видно из рис. 3, составляет около 10 мрад. при $\frac{\Delta p}{p} = 0$.

ПРИЛОЖЕНИЕ I

Программа BCIFVE

Программа BCIFVE служит для расчетов одно-временного влияния случайных возмущений поля (Δ) и ошибок в горизонтальном смещении линз (δ_{0z}) в бустере протонного синхротрона ИФВЭ на основе уравнений движения (1), (2).

В программе BCIFVE используются библиотечные программы системы "Дубна":

1. DFEQS1 - интегрирование системы дифференциальных уравнений методом предектора-корректора Робертсона.

Входные параметры:

SFI - шаг интегрирования системы (1), (2).
XON - независимое переменное (s) в уравнениях движения (1), (2).

APSI(1) - нормальное отклонение от равновесной орбиты в медианной плоскости (x).

APSI(2) - $\frac{dx}{ds}$.

APSI(3) - отклонение по вертикальной оси (z).

APSI(4) - $\frac{dz}{ds}$.

EXTERN - подпрограмма вычисления правых частей уравнений движения (1), (2).

2. NORMCO - генератор пары случайных чисел с нормальным распределением.

Структура: Программа, идентификатор - BCIFVE, входных, внешних устройства - не используются, обращение к внешним программам - DFEQS1, NORMCO.

```

PROGRAM BCIFVE
DIMENSION APSI(4),AR(300)
DIMENSION SLUCHM(56)
COMMON /BLK/ AKA,MN,DELTA,DELOZ
EXTERNAL EXTERN
NO=0.0
2
3 NP=1
4 NO=NO+1
5 KONO=203
6 P=826.36
7
8 XON=0.0
9
10 APSI(1)=0.0
11
12 APSI(2)=0.0
13
14 APSI(3)=0.0
15
16 APSI(4)=0.0
17
18 NI=1
19
20 JI=1
21
22 NA=0
23
24 JIK=1
25
26 M=1
27
28 K=0
29
30 M=4
31
32 I=4
33
34 J=1
35
36 JK=0
37
38 GO TO 8
39
40 J=2
41
42 JK=1
43
44 PRO=100.0
45
46 XON=XON+100.0
47
48 26 APSI(1)=APSI(1)+APSI(2)*PRO
49
50 APSI(2)=APSI(2)
51
52 APSI(3)=APSI(3)+APSI(4)*PRO
53
54 APSI(4)=APSI(4)
55
56 GO TO 8
57
58 14 J=3
59
60 JK=2
61
62 ALFA=0.26179935
63
64 AKA=0.01+0.17452007
65
66 XON=XON+100.0
67
68 23 APSI(1)=APSI(1)
69
70 APSI(2)=APSI(2)+AKA*APSI(1)*ATAN(ALFA*0.25)
71
72 APSI(3)=APSI(3)
73
74 APSI(4)=APSI(4)-AKA*APSI(3)*ATAN(ALFA*0.25)
75
76 GO TO 8
77
78 16 J=4
79
80 JK=3
81
82 AKA=0.01+0.17452007
83
84 MN=1
85
86 GO TO (81,85),JI
87
88 81 CALL NORMCO (SL1,SL2,0.0,0.0,0.0005,0.0005,0.0)
89
90 DELTA=SL1
91
92 SLUCHM(NI)=SL1
93
94 SLUCHM(NI+2)=SL2
95
96 PEROD=SL2
97
98 GO TO 82
99
100 85 DELTA=SLUCHM(NI)
101
102 PEROD=SLUCHM(NI+2)
103
104 82 SFI=450.01/100.0
105
106 JI=1
107
108 CALL DFEQS1 (1,4,SFI,XON,APSI,EXTERN)
109
110 4 CALL DFEQS1 (2,4,SFI,XON,APSI,EXTERN)

```

```

59 I=I+1
60 IF (I.EQ.50)
61 GO TO 17
62 33 GO TO 4
63 17 GO TO (46,49),IJ
64 18 IJ=2
65 I=0
66 GO TO 8
67 19 J=5
68 JK=4
69 GO TO 8
70 20 AKA=0.01+0.17492007
71 JK=9
72 J=6
73 GO TO 23
74 24 J=7
75 JK=6
76 PRO=25.0
77 XON=XON+25.0
78 GO TO 26
79 27 J=8
80 JK=7
81 AKA=0.0
82 MN=2
83 GO TO (181,185,190),JIK
84 181 CALL NORPCD (SL1,SL2,0.0,0.0,0.01,0.01,0.0)
85 DELOZ=SL1
86 SLUCM(MI+1)=SL1
87 SLUCM(MI+2)=SL2
88 VTOR08=SL2
89 NI=MI+3
90 JIK=2
91 GO TO 182
92 185 DELOZ=VTOR08
93 JIK=4
94 NI=MI+3
95 GO TO 182
96 190 DELOZ=SLUCM(MI+1)
97 MI=MI+3
98 182 SFI=33.31/100.0
99 KJ=1
100 CALL DFEQS1 (1,4,SFI,XON,APSI,EXTERN)
101 28 CALL DFEQS1 (2,4,SFI,XON,APSI,EXTERN)
102 M=M+1
103 IF (M.EQ.50)
104 GO TO 29
105 34 GO TO 28
106 29 GO TO (30,31),KJ
107 30 KJ=2
108 M=0
109 GO TO 8
110 31 J=9
111 JK=8
112 GO TO 8
113 32 J=10
114 PRO=76.29
115 JK=9
116 XON=XON+76.29
117 GO TO 26
118 35 J=11
119 JK=10
120 SFI=57.14/100.0
121 NJ=1
122 I=4
123 MN=5
124 CALL DFEQS1 (1,4,SFI,XON,APSI,EXTERN)

```

```

125 36 CALL DFEQS1 (2,4,SFI,XON,APSI,EXTERN)
126 I=I+1
127 IF (I.EQ.50)
128 GO TO 38
129 37 GO TO 34
130 38 GO TO (39,40),MJ
131 39 NJ=2
132 I=0
133 GO TO 8
134 40 J=12
135 JK=11
136 GO TO 8
137 41 J=13
138 JK=12
139 XON=XON+76.29
140 GO TO 26
141 42 J=14
142 JW=73
143 SFI=33.31/100.0
144 MJ=1
145 M=4
146 MN=2
147 CALL DFEQS1 (1,4,SFI,XON,APSI,EXTERN)
148 45 CALL DFEQS1 (2,4,SFI,XON,APSI,EXTERN)
149 M=M+1
150 IF (M.EQ.50)
151 GO TO 45
152 44 GO TO 43
153 45 GO TO (46,47),MJ
154 46 MJ=2
155 M=0
156 GO TO 8
157 47 J=15
158 JK=14
159 GO TO 8
160 48 J=16
161 JK=15
162 PRO=25.0
163 XON=XON+25.0
164 GO TO 26
165 49 J=17
166 JK=16
167 AKA=0.01+0.17492007
168 GO TO 23
169 50 J=18
170 JK=17
171 MN=1
172 DELTA=PEEQ8
173 SFI=450.01/100.0
174 IJ=1
175 I=4
176 CALL DFEQS1 (1,4,SFI,XON,APSI,EXTERN)
177 51 CALL DFEQS1 (2,4,SFI,XON,APSI,EXTERN)
178 I=I+1
179 IF (I.EQ.50)
180 GO TO 53
181 52 GO TO 51
182 53 GO TO (54,55),IJ
183 54 IJ=2
184 I=0
185 GO TO 8
186 55 J=19
187 JK=18
188 GO TO 8
189 56 J=20
190 JK=19

```

```

191          GO TO 25
192
193 57 JK=20      PRP=100.0
194      XON=XON+100.0
195      GO TO 26
196 58 S=S+P
197      NR=NP+1
198      IF (NP.EQ.43)
199          GO TO 75
200
201      GO TO 72
202 73 PRINT 80,SLUCHM
203 80 FORMAT (1X,F12.9)
204      NA=NA+1
205      NOMER=NA
206      PRINT 74,NO,NOMER
207 74 FORMAT (1X,I3,1X,SHNOMER,5X,I3,1X,6HOBOROT)
208      NP=1
209      NO=NO+1
210      IF (NA.EQ.40)
211          GO TO 83
212
213      JIK=3
214      MI=1
215      JI=2
216      GO TO 84
217 83 JI=1
218      NI=1
219      NA=0
220      JIK=1
221      XON=0.0
222      APSI(1)=0.0
223      APSI(2)=0.0
224      APSI(3)=0.0
225      APSI(4)=0.0
226      NOMER=0.0
227 84 IF (NO.EQ.XONO)
228      GO TO 12
229
230      GO TO 72
231 8 AR(N)=JK
232      AR(N+1)=XON
233      AR(N+2)=APSI(1)
234      AR(N+3)=APSI(2)
235      AR(N+4)=APSI(3)
236      AR(N+5)=APSI(4)
237      N=N+6
238      K=K+1
239 15 IF (K.EQ.21)
240      GO TO 5
241
242      GO TO (9,14,16,4,20,24,27,28,32,35,
243      43,44,42,48,48,49,50,51,56,57),J
244 9 PRINT 71,NR
245 71 FORMAT (15X,I2,2X,6HPERIOD)
246      PRINT 7
247 7 FORMAT (32X,1HN,10X,1HS,16X,1HX,14X,
248      15HX,5 T,14X,1HZ,14X,5HZ,5 T)
249      DO 10 L=1,128,6
250          LL1=L
251              LL2=L+1
252                  LL3=L+2
253                      LL4=L+3
254                          LL5=L+4
255                              LL6=L+5
256      PRINT 11,AR(LL1),AR(LL2),AR(LL3),AR(LL4),AR(LL5),AR(LL6)
257 11 FORMAT (51X,I2,2X,5(F17.8))
258 10 CONTINUE
259      GO TO 58
260 42 AR(N)=JK

```

```

259      AR(N+1)=XON
260      AR(N+2)=APSI(1)
261      AR(N+3)=APSI(2)
262      AR(N+4)=APSI(3)
263      AR(N+5)=APSI(4)
264      PRINT 21
265 21 FORMAT (32X,1HN,10X,1HS,16X,1HX,14X,
266      15HX,5 T,14X,1HZ,14X,5HZ,5 T)
267      ND2A=N+6
268      DO 23 K=1,ND2A,6
269          LL1=K
270              LL2=K+1
271                  LL3=K+2
272                      LL4=K+3
273                          LL5=K+4
274                              LL6=K+5
275      PRINT 22,AR(LL1),AR(LL2),AR(LL3),AR(LL4),AR(LL5),AR(LL6)
276 22 FORMAT (31X,I2,2X,5(F17.8))
277 13 CONTINUE
278      END
279
280 SUBROUTINE EXTERN (XO,PSI,W)
281 DIMENSION W(4),PSI(4)
282 COMMON /BLCK/ AKA,MN,DELTA,DELOZ
283 GO TO (40,44,43),MN
284 40 DELN=0.0
285      A=10.0
286      FKV=0.0
287      FKUB=0.0
288      D1=1.0+DELTA+DELN*AKA*PSI(1)
289      D2=FKV*((PSI(1)/A)**2)
290      D3=FKUB*((PSI(1)/A)**3)
291      FZ=D1+D2+D3
292      D4=(3.0*FKUB*(PSI(1)**2))/(A**3)
293      D5=(2.0*FKV*PSI(1))/(A**2)
294      FX=(DELN*AKA+D5+D4)*PSI(3)
295      GO TO 41
296 43 DEF=-0.08141
297      GO TO 42
298 44 DEF=0.08141
299 42 DELOZ=0.0
300      DELTA1=0.0
301      DELTA2=0.0
302      DELTA6=0.0
303      D6=5.0*(PSI(3)**4)
304      D7=PSI(1)**4
305      D8=10.0*(PSI(1)**2)*(PSI(3)**2)
306      D9=DELTA6*PSI(1)*(D6-D8+D7)
307      D10=DELOZ*(1.0+DELTA1)*PSI(1)
308      FZ=DEF*(D10-DELTA2*PSI(3)+D9)
309      D11=5.0*(PSI(1)**4)
310      D12=PSI(3)**4
311      D13=DELTA6*PSI(3)*(D11-D8+D12)
312      D14=DELOZ*(1.0+DELTA1)*PSI(3)
313      FX=DEF*(D14+DELTA2*PSI(1)+D13)
314 41 B1=2.0*AKA*PSI(2)
315      B2=1.0+AKA*PSI(1)
316      B3=1.0/B2
317      B4=PSI(2)**2
318      B5=PSI(4)**2
319      B6=B2**2
320      B7=B6*B4
321      B8=B6*B5
322      A1=B1*PSI(2)*B3
323      A2=AKA*B2
324      R1=573.0
325      FS=0.0
326      B9=(1.0/R1)*SQRT (B7+B8)
327      A3=B7*B5*FZ

```

```

46      R10=PSI(2)*PSI(4)*B3      A4=B10*FX
47
48      A5=PSI(4)*P5      W(1)=PSI(2)
49      W(2)=A1+A2*B3*(A3-A4-A5)
50      C1=R1*PSI(4)*B3      C2=B8*B3*FX
51
52      C3=B10*FZ      C4=PSI(2)*F5      W(3)=PSI(4)
53
54      W(4)=C1+B3*(C2-C3-C4)
55      END
56

```

Краткая инструкция для использования программы BCIFVE

Номера и значения операторов программы, подлежащих изменению:

№		
4	KONO	- общее число оборотов во всех наборах,
7	XON =	
8	APSI(1) =	}
9	APSI(2) =	
10	APSI(3) =	
11	APSI(4) =	
47	}	задание параметров (среднего значения и дисперсии) подпрограммы NORMCO, ,
84		
207	NA=K	- число оборотов при одной случайной выборке
	IF(NA.EQ.K) GO TO 83	
217	XON =	}
218	APSI(1) =	
219	APSI(2) =	
220	APSI(3) =	
221	APSI(4) =	

Рядом несложных преобразований программы BCIFVE могут быть проведены расчеты основных параметров бустера для идеального магнитного поля, влияние статистических ошибок в значениях других параметров бустера, расчеты по определению коэффициента расширения орбит.

Было проведено исследование распределения выборочного среднеквадратичного значения выборочной совокупности квазислучайных чисел, генерируемых программой NORMCO при различных объемах выборки.

Показано, что относительные колебания выборочной дисперсии при используемых объемах выборки практически не влияют на функцию распределения отклонений орбит.

Литература

1. Ю.М.Адо, В.И.Балбеков, А.А.Васильев и др. Труды II Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц (ноябрь 1970 г.), М., изд. "Наука", 1972 г., стр. 47.
2. В.И.Котов, В.В.Миллер. Фокусировка и разделение по массам частиц высоких энергий. Москва, Атомиздат, 1969.
3. В.П.Дмитриевский, В.В.Кольга, Т.М.Прилипко. Препринт ИФВЭ, СКУ 68-47, 1968.

Рукопись поступила в издательский отдел
14 июля 1975 года.