

917885

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На правах рукописи

К-887

УДК 621.384.634.5.01

9-87-884

КУДИН

Валерий Николаевич

ОПЕРАТИВНЫЙ МЕТОД ВЫЧИСЛЕНИЙ
И АВТОМАТИЧЕСКАЯ КОРРЕКЦИЯ
ПОПЕРЕЧНЫХ СМЕЩЕНИЙ ПУЧКА
В КОЛЬЦЕВОМ УСКОРИТЕЛЕ

Специальность: 01.04.20 - физика пучков
заряженных частиц и ускорительная техника

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 1987

Работа выполнена в Московском Радиотехническом институте
Академии Наук СССР.

Научный руководитель – доктор технических наук
ВАСИЛЬЕВ А.А.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор КОЧЕТУРОВ В.А.

доктор физико-математических наук
КОЛЬГА В.В.

Ведущая организация – Институт теоретической и
экспериментальной физики (Москва).

Защита диссертации состоится "___" _____ 1987 г.
в "___" часов на заседании специализированного совета
Д 047.01.03 при Лаборатории ядерных проблем Объединенного
института ядерных исследований, Дубна.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЛЯП ОИЯИ.

Автореферат разослан "___" _____ 1987 г.

Ученый секретарь
специализированного совета
доктор физико-математических
наук

В.А. Батусов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Развитие ускорительной техники характеризуется постоянным увеличением энергии ускоряемых частиц. Это приводит к увеличению размеров и усложнению ускорительных комплексов. Например, в ИВФЭ сооружается ускорительно-накопительный комплекс (УНК), в состав которого входят четыре кольцевых ускорителя с жесткой фокусировкой: бустер на 1,5 ГэВ, протонные синхротроны на 70 ГэВ, на 600 ГэВ и на 3000 ГэВ. По мере увеличения размеров ускорителей становится все труднее выполнять требования к точности изготовления магнитных систем и воспроизведения магнитного поля в камере кольца. В связи с этим на ускорителях широко применяется коррекция поперечных колебаний частиц по данным о положении пучка. За счет автоматической коррекции положения пучка осуществляется выигрыш в рабочей области апертуры вакуумной камеры, повышение надежности и стабильности работы ускорителя. За последние годы исследование и использование автоматической коррекции поперечного положения пучка для кольцевых ускорителей и накопителей развивались в таких крупных центрах, как FNAL (Батavia), ИВБЭ (Серпухов), CERN (Женева), ИТЭФ (Москва), ОИЯИ (Дубна), ИЯФ СО АН СССР (Новосибирск), ЕРФИ (Ереван), SLAC (Стеффорд), IPRC (Токио) и др., что свидетельствует о большом научном и прикладном значении таких работ.

Успешное решение проблемы автоматизированной коррекции поперечных колебаний пучка связано с обеспечением детальными сведениями о бетатронных смещениях пучка, начиная с первых оборотов. Отличие (уменьшение на порядок) на практике эффективности подавления колебаний от предполагаемой эффективности выдвигает задачи обоснования структуры алгоритма коррекции и оценки эффективности подавления смещений частиц в ускорителе с жесткой фокусировкой.

В теоретическом плане исследование задач коррекции и диагно-

стики параметров поперечного движения затруднено из-за применения численных методов расчета смещений частиц и использования понятия замкнутой орбиты вместо рассмотрения универсального (не только периодического) частного решения уравнения для смещений частиц. В свою очередь представление частного решения дифференциального уравнения 2-го порядка (типа уравнения Хилла) с помощью вариации постоянных решения однородного уравнения составляет определенную трудность, так как соответствующие фундаментальные решения не выражаются через элементарные функции, и для них обычно используются разложения в бесконечные ряды. Эти разложения неудобны для оперативных вычислений в автоматизированных системах коррекции и исключают возможность решения обратных задач при определении реальных характеристик источников поперечных смещений частиц, а также требуют значительных затрат счетного времени в случае моделирования поперечного движения частиц при выборе магнитной структуры ускорителя с жесткой фокусировкой.

Таким образом, применение автоматизированных систем коррекции поперечного движения частиц и неопределенность в выборе алгоритма и критерия эффективности подавления смещений; использование численных методов расчета смещений частиц и отсутствие аналитических (с конечным числом вычислений) решений, соответствующих возбуждаемым и регистрируемым смещениям пучка; опыт эксплуатации крупнейших кольцевых ускорителей и методы оперативной диагностики параметров бетатронного движения частиц; это те актуальные проблемы практики и теории, решению которых посвящена настоящая работа. Исследование указанных проблем представляет собой научный и практический интерес и является своевременным.

Цель и задачи исследования. Основной целью работы является разработка аналитического метода оперативных вычислений попереч-

ных смещений частиц для анализа возмущений и коррекции бетатронного движения пучка в кольцевом ускорителе, что связано с решением следующих задач:

- получение аналитических, алгебраически связанных с элементарными функциями, соотношений для поперечных смещений частиц в ускорителе с жесткой фокусировкой;
- обоснование необходимой структуры алгоритмов автоматической коррекции и адекватного критерия подавления поперечных смещений пучка;
- разработка методики определения параметров бетатронного движения частиц по информации датчиков положения пучка с 2-х оборотов.

Научная новизна. Показано, что частное решение дифференциального уравнения, определяющего поперечные смещения частиц в камере кольцевого ускорителя с произвольной зависимостью распределения дипольных отклонений магнитного поля, может быть представлено с помощью элементарных функций аналитическим выражением, незначительно отличающимся от решения на участке кольца, где имеется отклонение, и совпадающим с решением на других азимутах. На основе полученных выражений выделены поддиапазоны измерений компоненты смещений частиц, относящиеся к смещениям на первом (с начала действия возмущения) обороте и при циркуляции, а также выявлена их связь с периодическими (замкнутой орбитой) и непериодическими (колебания с нецелой частотой) смещениями. Найдены точные зависимости от азимута для амплитудной и фазовой функций. Указана структура алгоритма и последовательность выполнения известных способов коррекции поперечных колебаний для обеспечения перехода пучка от оборота к обороту без потерь. Введен критерий эффективности подавления смещений частиц в виде отношения интервалов сме-

чений, не зависящий от условий выработки корректирующих воздействий. Предложены методы решения обратных задач для нахождения реальных параметров бетатронного движения по информации с датчиков, используемых при коррекции положения пучка в ускорителе с жесткой фокусировкой.

Практическая ценность работы. Разработана методика оперативных вычислений и создана счетная подпрограмма "ПАСБЕК" для точных расчетов характеристических функций (амплитудной функции, ее производной, набега фаз и т.п.) и параметров поперечного движения частиц (частоты бетатронных колебаний, экстремальных и средних значений амплитудной функции, максимальных смещений частицы и др.) при заданном распределении фокусирующих и отклоняющих магнитов на кольце ускорителя. Полученные зависимости, метод вычислений и подпрограмма были использованы для оперативных расчетов параметров поперечных колебаний частиц в модели кибернетического ускорителя, протонном синхротроне на 70 ГэВ, его кольцевом инжекторе на 1,5 ГэВ и бустере УНК на 600 ГэВ. В результате анализа полученных аналитических выражений для компонент смещений частиц в камере кольца была обоснована структура алгоритма автоматической коррекции замкнутой орбиты и условий инжекции по информации о положении пучка на модели кибернетического ускорителя. Методика нахождения реальных параметров бетатронного движения нашла применение на протонном синхротроне на 70 ГэВ при определении частоты, амплитуды и фазы поперечных колебаний, состава опасных гармоник магнитного поля и условий их коррекции на первых оборотах частиц. Результаты разработок и исследований применимы для кольцевых ускорителей с произвольной структурой фокусирующих и отклоняющих магнитных полей.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Разработан метод построения аналитического решения диф-

ференциального уравнения 2-го порядка типа уравнения Хилла, описывающего поперечные смещения частиц в кольцевом ускорителе. В результате возможен новый способ образования замкнутой орбиты и вынужденных колебаний за счет суммирования полученных параметрических зависимостей для универсального частного решения.

2. Найдены компактные зависимости от азимута для амплитудной и фазовой функций, где в качестве параметров используются экстремумы амплитудной функции и соответствующие им азимуты.

3. Созданы формализованные вычислительные подпрограммы, реализующие оперативный и точный расчет амплитудной и фазовой функций, смещений частиц и их интегральных параметров (частоты бетатронных колебаний, средних значений амплитудной функции, максимальных смещений и др.) для произвольной периодической структуры фокусирующих и отклоняющих магнитных полей.

4. Существуют компоненты поперечных смещений частицы, выделяемые из универсального частного решения, которые позволяют выработать алгоритм адекватной коррекции колебаний пучка по данным о смещениях пучка.

5. Утверждается, что для оценки эффективности подавления поперечных колебаний частиц необходимо использовать инвариантный критерий в виде отношения исходного и скорректированного интервалов смещений, которые представляют собой разность наибольшего и наименьшего смещений циркулирующей частицы.

6. Разработана методика определения реальных параметров бетатронного движения по информации датчиков положения с 2-х оборотов пучка для произвольного момента ускорения, особенно для первых оборотов.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на семинарах и научно-технических совещаниях

в МРТИ АН СССР и ИФВЭ, на 7-й Международной конференции по ускорителям заряженных частиц высоких энергий, на Всесоюзных совещаниях по ускорителям заряженных частиц, опубликованы в II печатных работах.

Структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения. Основная часть изложена на 162 страницах машинописного текста. В работе содержится 14 таблиц, 26 рисунков. Список использованной литературы включает 99 названий.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приводится обзор систем автоматизированной коррекции поперечного движения пучка в ускорителях с жесткой фокусировкой, показана актуальность проблемы. Констатируется, что работам в области управления бетатронным движением было свойственно рассмотрение вопросов рационального выбора структуры системы, решение вопросов развития и расширения сфер применения автоматизированных систем. Основным вопросом, связанным с разработкой последовательности выполнения различных алгоритмов коррекции поперечных смещений частиц и подходящего критерия подавления их, а также с разработкой алгоритмов обработки информации о положении пучка для диагностики параметров колебаний в этих работах, подробно не изучался. Кроме того, отмечается, что использование численных методов расчета смещений частиц усложняет проведение оценки эффективности автокоррекции положения пучка для значительного количества вариантов распределений отклонений магнитного поля и условий инжекции пучка. Наряду с этим нахождение адекватных решений при регулировании смещений затрудняется в связи с отсутствием простых аналитических зависимостей для текущих и экстремальных значений поперечных смещений частиц в жесткофокусирующем ускорителе.

I-я глава диссертации посвящена описанию аналитического метода, использующего элементарные функции, для оперативных вычислений поперечных смещений частиц относительно идеальной орбиты в ускорителе с жесткой фокусировкой. Зависимость смещений $Z(\theta)$ от азимута θ подчиняется в линейном приближении дифференциальному уравнению 2-го порядка (типа уравнения Хилла)

$$\frac{d^2 Z}{d\theta^2} + N(\theta) \cdot Z = \Delta \Phi(\theta) \quad (I)$$

с периодическими коэффициентами, связанными соответственно с фокусирующими (квадруполь, показатель спада $n(\theta)$) и отклоняющими (диполь, возмущения $\Delta B(\theta)$) магнитными полями. Известно, что решение однородного уравнения (I) можно представить в аналитической форме, если имеется решение для амплитудной функции. При этом в общем случае частное решение, основанное на вариации постоянных решения однородного уравнения, нельзя представить аналитической зависимостью с конечным числом элементарных вычислений. В работе предлагается запись частного решения уравнения (I) в аналитической форме, которая, во-первых, алгебраически связана с элементарными функциями при несуществующих погрешностях и, во-вторых, использует точные аналитические зависимости для амплитудной $\beta(\theta)$ и фазовой $\int N(\theta)$ функций. Предлагаемая запись не ограничивается описанием замкнутой орбиты и позволяет выделить компоненты смещений, которые соответствуют вынужденным смещениям на I-м обороте, где еще не сказывается периодичность возмущающих сил.

Новизна заключается в представлении частного решения $Z_z(\theta)$ суммой неперiodических на обороте решений $Z_{zy}(\theta)$, непосредственно связанных с J возмущениями на кольце. Суть суммирования на рассматриваемом обороте сводится к учету наряду с вновь воз-

будущими смещениями также смещений, ранее возникших на предыдущих оборотах. Таким образом, смещения частиц на произвольном обороте определяются, с одной стороны, суммой по J возмущениям на одном обороте и, следовательно, должны описываться функцией $Z_I = Z_I|_{\ell=1}$

и, с другой стороны, суммой по ℓ оборотам непереродических компонент с предыдущих оборотов, т.е. должны характеризоваться функцией $Q = Z_I|_{\ell \geq 2}$. Предлагаемое суммирование удается выполнить при замене интегральной зависимости $Z_{I,J}(\theta)$ упрощенной функцией $X_J(\theta)$, несущественно отличающейся от $Z_{I,J}$ на отрезке, где имеется отклонение $\Delta B_J(\theta)$, и совпадающей с $Z_{I,J}$ вне этого отрезка. Доказано, что в $X_J(\theta)$ можно выделить множитель в виде тригонометрической функции с двумя параметрами A_J и θ_J , которые определяют экстремальные и нулевые смещения частиц, вызванные распределением $\Delta B_J(\theta)/B$ - относительного отклонения поля, т.е.

$$Z_{I,J}(\theta) \rightarrow X_J(\theta) = A_J \sqrt{\beta(\theta)/\beta_{\max}} y(\theta - \theta_J) \sin(\mu(\theta) - \mu(\theta_J) + 2\pi \ell (2\ell - 1)), \quad (2)$$

где $A_J = g_J \frac{\Delta b_J}{B}$, величина Δb_J - постоянное отклонение поля, эквивалентное распределению $\Delta B_J(\theta)$; g_J и θ_J - характеристики (сила и место приложения) J -го возмущения; ступенчатая функция $y(v) = 0$ при $v < 0$ и $y(v) = 1$ при $v \geq 0$; фазовая функция $\mu(\theta) = \int d\theta/\beta(\theta) = Q \cdot \psi(\theta)$, Q - частота бетатронных колебаний.

В результате суммирования выделены три функции смещений частиц, необходимые для анализа регистрируемых и корректируемых смещений начиная с первых оборотов: $Z_I(\theta) = \sum_{J=1}^N Z_{I,J}(\theta)$ для вынужденных смещений на I -м (с момента возбуждения отклонений) обороте, $h(\theta) = Z_I(\theta) + Q_{II}(\theta) = \sum_{J=1}^N h_J(\theta)$ для смещений замкнутой орбиты, так как периодична каждая функция

$$h_J(\theta, A_J, \theta_J) = \sqrt{\beta(\theta)/\beta_{\max}} (A_J/2 \sin J\theta) \cos Q(\psi(\theta) - \psi(\theta_J) - J) \quad (3)$$

и $Z_{II}(\theta, e) = Z_{II}(\theta, e) + Q_{II}(\theta, e)$ для смещений за счет результирующих колебаний с частотой Q , неравной целому числу. Функция $Q_{II}(\theta) = -Q_{II}(\theta, e)|_{\ell=2}$, так как $Q_{II}(\theta, e) = Q_{II}(\theta, e) + Q_{II}(\theta)$ определяет смещения частиц с $\ell = 2$ оборота, когда обязаны учитываться все N отклонений поля. Функция

$$Q_{II}(\theta, e, a_N, u_N) = \sqrt{\beta(\theta)/\beta_{\max}} (-a_N/2 \sin J\theta) \cos Q(\psi(\theta) - \psi(\theta_N) + \pi(2\ell - 1)), \quad (4)$$

где амплитуда и фаза результирующих вынужденных колебаний характеризуются соответственно параметрами $a_N = a(A_1, \theta_1; \dots; A_N, \theta_N)$ и $u_N = u(A_1, \theta_1; \dots; A_N, \theta_N)$. Аналитическая запись функций (2)-(4), параметры которых определяются характеристиками Δb_J , g_J и θ_J дипольных отклонений поля, позволяет значительно упростить исследование поперечных смещений частиц в кольцевом ускорителе с жесткой фокусировкой.

Вторая часть упомянутого построения аналитического представления поперечных смещений частиц базируется на использовании точных решений для амплитудной и фазовой функций от азимута. Форма записи предлагаемых решений удобна тем, что параметрами зависимостей являются экстремумы и соответствующие им значения азимутов амплитудной функции. Эти параметры позволяют провести качественный анализ поперечного движения частиц в ускорителе с жесткой фокусировкой. Для широкого круга задач, где фокусировка характеризуется ступенчатой зависимостью $K(\theta) = \sum_{i=1}^I \chi(\theta, \theta_i^-, \theta_i^+) K_i$ с функцией включения $\chi_i(\theta) = y(\theta - \theta_i^-) - y(\theta - \theta_i^+)$, в работе указывается алгоритм нахождения параметров функции $\beta(\theta) = \sum_{i=1}^I \chi_i(\theta) \beta_i(\theta)$

на основе решения нелинейного дифференциального уравнения 2-го порядка на отрезке с постоянным градиентом магнитного поля и сшивания найденных решений согласно условиям непрерывности

периодической амплитудной функции и ее производной. Набор K_i представлен следующими величинами: $K_i = 0$ для свободного промежутка, $K_i = (R/\rho)^2$ для поворотных магнитов с постоянным полем, $K_i = \pm 1/2(R/\rho)^2$ для квадрупольных линз, характеризующихся показателем спадания n фокусирующего поля, где R - периметр кольца, деленный на 2π , ρ - радиус кривизны траектории частиц. В работе показано, что с помощью реальной и мнимой части характеристики $t_i = \sqrt{K_i}$ удается на i -ом отрезке представить характеристические функции бетатронного движения ($\beta(\theta)$, $d\beta/d\theta$, $\psi(\theta)$, $\beta(\psi)$, $\theta(\psi)$ и т.п.) компактными аналитическими зависимостями с двумя параметрами - экстремумом β_2 и соответствующим ему азимутом C_2 :

$$\beta_i(\theta) = \beta_{2i} + \left(\frac{1}{t_i^2 \beta_{2i}} - \beta_{2i} \right) \sin^2 t_i (\theta - C_{2i}), \quad \mu_i(\theta) = \mu_{2i} + \arctg \left[\frac{t_i t_i(\theta - C_{2i})}{t_i \beta_{2i}} \right] \quad (5)$$

Соотношения (5) позволяют использовать в (2)-(4) характеристики магнитов g_i и e_i , определяемые только амплитудной функцией на отрезке расположения магнита, выразить через параметры фокусирующего поля. В качестве примера в работе приведены параметры амплитудной функции β_{2i} и C_{2i} для структуры фокусирующих магнитных полей и характеристики g_i и e_i дипольных магнитов соответственно модели кибернетического ускорителя (МКУ), протонного синхротрона на 70 ГэВ (У-70), кольцевого инжектора на 1,5 ГэВ (БУ-70) в У-70 и бустера УНК на 600 ГэВ (БУ-3000). Расчеты выполнялись с помощью разработанной подпрограммы "ПАФСЕК", предназначенной для оперативных и точных вычислений параметров амплитудной функции и смещений бетатронных колебаний в произвольной структуре фокусирующих и отклоняющих магнитных полей. Текст "ПАФСЕК", содержащий на языке ФОРТРАН около 250 операторов, помещен в приложение.

Для приближенного вычисления амплитудной функции предлагается использовать аппроксимацию β -функции параболой от азимута на различных отрезках, т.е.

$$\beta_i(\theta) = \beta_{2i} + a_i (\theta - C_{2i})^2, \quad \mu_i(\theta) = \mu_{2i} + \arctg \left[\frac{a_i (\theta - C_{2i})}{\beta_{2i}} \right] / \xi_i,$$

где $3\bar{i}$ величин $\xi_i^2 = a_i \beta_{2i}$, β_{2i} , C_{2i} являются параметрами. Отмечено, что решение (5) при $K_i = 0$ совпадает с параболической аппроксимацией при $\xi_i = 1$. Однако именно произвольность параметра ξ_i позволяет применить аппроксимацию амплитудной функции параболой на отрезке, где имеется фокусирующее поле.

2-я глава посвящена построению алгоритма оптимального регулирования положения пучка по информации о смещениях пучка с целью уменьшения смещений орбиты частиц в ускорителе с жесткой фокусировкой. Различные способы коррекции сводятся к двум известным методам: гармонической компенсации и коррекции по участкам, последовательно расположенным на кольце. В работе предлагается для упомянутых методов коррекции и для указанных ниже дополнительных ступеней коррекции использовать информацию о положении пучка только с двух оборотов. Показано, что этой информации достаточно для диагностики параметров поперечного движения частиц и организации последовательности однозначных ступеней коррекции, обеспечивающих минимум или исключение потерь частиц при неопределенных начальных условиях движения пучка в камере кольца ускорителя. Структура алгоритма коррекции основывается на выделении и подавлении свободных колебаний Z_{free} и компонент Z_1 и $\frac{dZ}{dt}$, описывающих вынужденные смещения частиц, в любой момент времени в пределах 2-х рассматриваемых оборотов.

В работе предлагается последовательность из 4-х ступеней коррекции. 1-я ступень предназначена для уменьшения смещений пучка

относительно оси камеры с целью дополнительного перемещения пучка, которое необходимо при разделении свободных и вынужденных колебаний. Дополнительные (с 2-й по 4-ю) ступени обеспечивают движение пучка по замкнутой орбите, подавление которой усиливается от ступени к ступени. Первая ступень коррекции - это авторегулирование положения пучка на \mathcal{L} участках кольца (в случае, когда пучок не может совершить полный оборот), так называемая обработка "первого оборота", где совместно корректируются

$Z_{\text{вз}}(\theta) |_{\theta=1}$ и $Z_1(\theta)$. Если пучок пролетает хотя бы 1 оборот, то в качестве 1-й ступени применима коррекция методом компенсации гармоник. 2-я ступень - обеспечение выхода пучка на исходную замкнутую орбиту путем расчета поправок $\tilde{\Delta} b_{1,2,\dots,l} (\Delta b_1, \dots, \Delta b_l)$

к полям 2-х последних корректоров для установления на азимуте ввода θ_0 нулевых смещений и угла замкнутой орбиты, связанной только с найденными корректирующими полями. 3-я ступень - осуществление ввода пучка на замкнутую орбиту, связанную с исходными погрешностями магнитного поля, путем изменений смещения

$\Delta Z_{\text{вз}}(\theta)$ и угла $\Delta Z_{\text{вз}}^2(\theta)$ по информации о разностях положения пучка на 2-х оборотах. Если известны условия ввода пучка на ось камеры кольца, то найденные условия ввода позволяют согласно (3) рассчитать на азимуте θ_0 смещение $h_{\text{вх}}(\theta)$ и угол $h'_{\text{вх}}(\theta)$.

Исходной замкнутой орбиты. 4-я ступень - коррекция замкнутой орбиты посредством компенсации разности вынужденных колебаний

$$\Delta Q_{II}(\theta) = Q_{II}(\theta, h_{\text{вх}}(\theta), h'_{\text{вх}}(\theta)) - Q_{II}(\theta, \Delta b_1, \dots, \Delta b_l)$$

В итоге применения предлагаемой последовательности ступеней коррекции обеспечивается адекватная коррекция, когда корректирующие поля на кольце подавляют смещения пучка, вызванные только отклонениями поля на кольце, и скорректированы условия ввода с

помощью корректоров, относящихся к каналу инжекции. Кроме того, благодаря указанному алгоритму коррекции при неизвестных исходных условиях влета пучка в кольцо и отклонениях магнитного поля осуществляется движение пучка с минимальными смещениями от оси камеры, так как пучок находится на результирующей замкнутой орбите.

В 3-й главе анализируются методы оценки эффективности подавления поперечных смещений частиц в ускорителе с жесткой фокусировкой. Применяемые методы оценки эффективности коррекции по изменению максимальных смещений частиц на одном обороте не учитывают, что эти характеристики не являются наибольшими смещениями циркулирующей частицы, которые равны сумме экстремумов вынужденных и свободных колебаний. Однако рассчитать наибольшие смещения частиц путем численного интегрирования уравнения (1) не удастся, так как неизвестно, где на кольце и на каком обороте они будут иметь место. Для приближенных методов оценки эффективности коррекции, основанных на Фурье разложении или сплайнном приближении, требуется, с одной стороны, большое число гармоник, особенно, когда в исходном спектре отсутствуют опасные моды, и, с другой стороны, учет возбуждения посторонних, нередко опасных, гармоник, связанных с коррекцией. При этом затруднен учет возможного отклонения отдельного корректора.

Неизбежна закладывается в использовании для оценки эффективности коррекции отношения исходного и скорректированного интервалов смещений частиц \mathcal{D} . Величина \mathcal{D} представляет собой разность наибольших положительного \mathcal{H}_+ и отрицательного \mathcal{H}_- смещений частицы, которые определяются максимальными смещениями циркулирующей частицы, т.е. $\mathcal{H}_\pm = P_\pm \pm P$, где P_\pm - экстремумы замкнутой орбиты и P - амплитуда свободных колебаний. В свою очередь, значения P_+ и P_- могут быть вычислены с помощью аналитических соотношений для поперечных смещений частиц, описанных в 1-й главе.

группа параметров $A^{(j)}, \phi^{(j)}, Q^{(j)}$. Приближение с вычислениями более чем в 2 раза точнее, чем в случае ступенчатого приближения, это $j = 1$, группа параметров $A^{(j)}, \phi^{(j)}, Q^{(j)}$ и m амплитуд и фаз осциллирующих составляющих β -функции. Параболическая аппроксимация с погрешностью вычислений единицы % , это $j = 2$, группа параметров $A^{(j)}, \phi^{(j)}, Q^{(j)}$ и 3-1 величины β_x, C_x, ϵ_x . Наконец, точные аналитические зависимости (2)-(5) это $j = 3$, группа параметров $A = A^{(3)}, \phi = \phi^{(3)}, Q = Q^{(3)}$ и 3-1 величины β_x, C_x, K_i .

Установлена путем моделирования решения обратной задачи эмпирическая зависимость $\delta Q/Q \approx \Delta/N_g$ абсолютной погрешности определения частоты бетатронных колебаний δQ от максимальной величины Δ случайно распределенной относительной погрешности измерений смещений частиц и числа N_g датчиков, находящегося в пределах интервала $10 < N_g < 300$. Для У-70 $\delta Q \approx 0,0032$, где $N_g \approx 75, \Delta \approx 0,1$ и $Q = 9,776$. При этом моделировании установлено, что наличие колебаний с амплитудой P около замкнутой орбиты оказывает существенное влияние на ошибки определения гармоник поля, достигающих величин, равных $\text{Re} \cos \varphi \cdot X(q)$. Например, для У-70 при $q = 9, 10, 11$ величины $Y(q)$ составляют соответственно 0,27, 0,93, 0,17, а амплитуды этих гармоник основного поля в случае нахождения их по значениям замкнутой орбиты, заданным с помощью генератора случайных чисел в диапазоне ± 1 см, равны соответственно 0,012%, 0,005%, 0,013%. В программе "BETA" отмеченные источники ошибок исключаются, так как расчет параметров бетатронного движения выполняется после разделения свободных колебаний и замкнутой орбиты по информации о положении пучка с двух оборотов.

Основные результаты работ

I. Разработан метод построения аналитического решения для

уравнения, описывающего поперечные смещения частиц в ускорителе с жесткой фокусировкой. Этот метод позволяет предложить следующее: а) компактные аналитические зависимости от азимута, использующие элементарные функции, для оперативного и точного вычисления амплитудной и фазовой функций и поперечных смещений частиц; б) зависимости этих функций от параметров магнитной структуры для выбора распределений фокусирующих и отклоняющих полей на кольце; в) критерий эффективности подавления поперечных колебаний за счет изменения величины максимального смещения циркулирующей частицы, независимый от алгоритма нахождения корректирующего воздействия; г) аналитические приближения различной степени точности, обусловленной количеством и качеством информации о положении пучка.

2. Создан комплекс счетных подпрограмм "ПАФСБК" для вычисления параметров бетатронного движения частиц в периодических магнитных структурах различных ускорителей с жесткой фокусировкой, с разделенными и совмещенными функциями фокусировки и отклонения, с нарушениями непрерывности производной амплитудной функции. Применение комплекса позволило на 2-3 порядка уменьшить время точных расчетов параметров поперечных колебаний частиц (экстремальных и средних значений амплитудной функции, частот бетатронных колебаний, максимальных смещений и др.).

3. Проанализированы с помощью вычислительных программ известные методы автокоррекции положения пучка, выработаны рекомендации по применению методов коррекции по участкам и гармонической компенсации в зависимости от типа распределений отклонений дипольного магнитного поля по кольцу.

4. Предложен алгоритм дополнительной коррекции положения пучка, обеспечивающий циркуляцию без потерь частиц. Эта завершающая ступень коррекции совместно с обработкой "первого оборота"

позволяет проводить пучок по кольцу и осуществлять переход на следующий оборот для отклонений поля в несколько раз больших, чем при отклонениях, допустимых в случае коррекции другими методами. Благодаря этому обстоятельству усовершенствованный метод коррекции положения пучка по участкам кольца наиболее удобен для использования в малоапертурных ускорителях.

5. Предложена методика определения реальных параметров бетатронного движения по информации датчиков положения с 2-х оборотов пучка для произвольного момента ускорения, особенно для первых оборотов.

6. Разработан и запущен в эксплуатацию комплекс рабочих программ "ВЕТА" в системе АСИУ Серпуховского ускорителя на 70 ГэВ для определения реальных параметров поперечных колебаний пучка, относящихся к интервалу 2-х оборотов. Программа "ВЕТА" позволяет вычислять частоту бетатронных колебаний, начальные условия инжекции пучка, замкнутую орбиту и условия коррекции колебаний на 1-х оборотах пучка по информации автоматизированных измерений положения пучка.

7. Опыт эксплуатации системы АСИУ показал эффективность предложенных методов вычисления смещений частиц в прямой задаче и нахождения параметров бетатронного движения в обратной задаче.

Разработки были использованы для улучшения характеристик протонных синхротронов в РТИ АН СССР и ИФВЭ за счет сокращения в десятки раз времени выполнения диагностики параметров бетатронного движения частиц. Получен на ИФВЭ акт о внедрении комплексов программ "ВЕТА" и подпрограмм "ПАФСЕК".

Результаты диссертации могут быть использованы при выборе магнитной структуры и системы регулирования поперечного движения частиц в кольцевых ускорителях и накопителях заряженных частиц.

По материалам диссертации опубликованы следующие работы:

1. Васильев А.А., Кудин В.Н., Кузьмин Ю.С., Кузьмина Н.И. Регулирование положения пучка частиц в ускорителе при помощи управляющей вычислительной машины // Труды 7-й Международ. конф. по ускорителям заряженных частиц высокой энергии. - Ереван: Изд. АН Арм. ССР, 1970. - Т. I. - С. 404-412.
2. Абаджиди В.Е., Андрищенко-Луценко Н.И., Бацких Г.И., Васильев А.А., Иванов Ю.С., Кудин В.Н., Кузьмин А.А., Кузьмин Ю.С., Кузьмина Н.И., Мирносов В.А. Автоматический комплекс для управления моделью кибернетического ускорителя // Труды 2-го Всесоюз. совещания по ускорителям заряженных частиц. - М.: Наука, 1972. - Т. 2. - С. 249-250.
3. Васильев А.А., Кудин В.Н., Мирносов В.А., Бурцев В.Л., Макаров В.В., Никитин В.Д., Соловьев Г.Н., Осипов В.В., Шембель Б.К. Математическое обеспечение автоматизированной системы сбора информации ускорителя ИФВЭ // Труды 4-го Всесоюз. совещания по ускорителям заряженных частиц. - М.: Наука, 1975. - Т. 2. - С. 176-180.
4. Бурцев В.Л., Васильев А.А., Кудин В.Н., Макаров В.В., Никитин В.Д., Осипов В.В., Соловьев Г.Н., Шембель Б.К. Организация работ ЦЕМ в системе автоматизированного сбора информации и управления протонного синхротрона на энергии 70 ГэВ. - Препринт ИФВЭ ПКУ 75-80. - Серпухов, 1975. - 24 с.
5. Кудин В.Н. Аналитический метод расчета поперечных смещений частиц в кольцевом ускорителе // Труды РТИ АН СССР "Методы управления ускорителями". - М., 1976. - № 25. - С. 71-81.
6. Кудин В.Н. Аппроксимация амплитудной функции бетатронных колебаний полиномами 2-го порядка. - Там же. - С. 64-70.
7. Васильев А.А., Кудин В.Н., Мецеров Р.А., Мирносов В.А.,

Шукин Г.С., Бурцев В.Л., Забродин Л.Д., Макаров В.В., Соловьев Г.Н., Титов А.С., Акимов Ю.А., Куянов Ю.В., Осипов В.В., Сухорук-ов А.Н., Шембель Б.К., Наумов А.А. Комплекс аппаратно-програм-мных средств управления процессами в реальном масштабе времени для систем автоматизированного сбора информации ускорителя ИФВЭ // Труды 5-го Всесоюз. совещания по ускорителям заряженных час-тиц. - М.: Наука, 1977. - Т. 2. - С. 295-299.

В. Кудин В.Н. Определение параметров и условий коррекции по-перечных колебаний по информации автоматизированных измерений по-ложения пучка в кольцевом ускорителе // Труды РТИ АН СССР "Слож-ные системы. Машинное моделирование/. - М., 1978. - № 34. - С. 171-184.

9. Васина Ю.А., Дзергач А.И., Кудин В.Н., Кузьмин Ю.С., Ме-щеров Р.А., МIRONOS В.А. Система автоматизации нового комплекса инжекции Серпуховского ускорителя // Труды РТИ АН СССР "Аппарату-ра радиоэлектроники, диагностики и автоматизированного управления бустера Серпуховского ускорителя". - М., 1979. - № 35. - С. 4-12.

10. Круглова Т.Д., Кудин В.Н. Аналитические соотношения для амплитудной функции бетатронных колебаний частиц // Труды РТИ АН СССР "Функциональные узлы и системы нового поколения ускорителей". - М., 1980. - № 39. - С. 96-107.

11. Кудин В.Н. Метод оперативного вычисления амплитудной функции и поперечных смещений частиц в ускорителе с жесткой фоку-сировкой // Труды РТИ АН СССР "Функциональные узлы и системы уско-рителей заряженных частиц". - М., 1984. - С. 119-131.

Рукопись поступила в издательский отдел
17 декабря 1987 года.