

A - 695

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

9 - 8673

АНОСОВ Владимир Николаевич

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ИЗМЕРЕНИЙ
И АНАЛИЗА ТОПОГРАФИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ,
КОРРЕКЦИЯ ПОЛЯ ПО ФАЗЕ ПРОЛЕТА ПУЧКА
В ЦИКЛОТРОНАХ**

**Специальность 05.14.11 - электрофизические
установки и ускорители**

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

(Диссертация написана на русском языке)

Дубна 1975

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем
Объединенного института ядерных исследований

Научный руководитель - доктор технических наук Ю.Н.Денисов.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук И.А.Шелаев,
кандидат технических наук Г.С.Казанский.

Ведущее научно-исследовательское учреждение:

Институт ядерной физики Академии наук Казахской ССР, г.Алма-Ата.

Автореферат разослан " " _____ 1975 г.

Защита диссертации состоится " " _____ 1975 г. в " " час.

на заседании Ученого совета Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований по адресу: г.Дубна, Московской области, Объединенный институт ядерных исследований.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Ученый секретарь Совета
кандидат физ.-матем.наук

Ю.А.Батусов

9 - 8673

АНОСОВ Владимир Николаевич

АВТОМАТИЗАЦИЯ ИЗМЕРЕНИЙ
И АНАЛИЗА ТОПОГРАФИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ,
КОРРЕКЦИЯ ПОЛЯ ПО ФАЗЕ ПРОЛЕТА ПУЧКА
В ЦИКЛОТРОНАХ

Специальность 05.14.11 - электрофизические
установки и ускорители

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

(Диссертация написана на русском языке)

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

Современная физика элементарных частиц в качестве одного из главных условий, обеспечивающих ее дальнейший прогресс в изучении законов микромира, выдвинула проблему резкого увеличения интенсивности пучков частиц, получаемых от ускорителей высоких энергий. В области энергий до 1 Гэв эта проблема может быть успешно решена путем применения ускорителей с пространственной вариацией магнитного поля. В настоящее время уже построено несколько ускорителей такого типа — "мезонных фабрик"^{1,2)}.

Ввиду того, что магнитное поле циклотронов с пространственной вариацией имеет значительно более сложную конфигурацию в пространстве, чем поле классического циклотрона, объем измерений, необходимый для создания требуемой топографии поля в таких машинах, составляет несколько сот тысяч измерений поля в точке. В связи с этим для ускорителей с пространственной вариацией поля вопросы увеличения скорости измерения поля, а также скорости обработки результатов этих измерений представляют особый интерес.

Фазовое движение ускоряемых частиц относится к числу важнейших параметров, характеризующих работу ускорителя.

Реферируемая диссертация посвящена разработке автоматизированной системы измерения и обработки результатов измерения магнитного поля, а также исследованию и коррекции фазового движения в ускорителях с пространственной вариацией поля.

Диссертация обобщает работы автора, выполненные им в коллективе сотрудников Отдела новых ускорителей ЛЯП ОИЯИ за период с 1962

по 1973 гг., и состоит из введения, четырех глав и заключения. Основные положения диссертации изложены в работах /10-16/

I. Автоматизация измерения магнитных полей изохронных циклотронов.

С целью увеличения скорости магнитных измерений разработан автоматизированный измерительный стенд, включающий в себя следующие устройства: /10/

1/ электромеханическое устройство, служащее для перемещения датчика поля в зазоре магнита и фиксации азимутальной координаты в процессе непрерывного движения,

2/ прецизионный холловский магнитометр,

3/ цифровой вольтметр типа ДМ-2010 (имеющий 5 десятичных знаков), преобразующий э.д.с. Холла в двоично-десятичный код,

4/ блок вывода данных с цифрового вольтметра на перфоратор ПД-80/8,

5/ блок вывода данных с цифрового вольтметра на печатающую машинку ЭУМ-46ДП,

6/ блок управления работой всех устройств автоматизированного стенда.

Поскольку операция установления датчика поля на требуемый радиус повторяется примерно на два порядка реже, чем операция азимутального перемещения датчика, автоматизировано лишь азимутальное перемещение.

Для обеспечения максимальной скорости измерения поля азимутальное перемещение датчика сделано непрерывным. Это потребовало запоминания э.д.с. Холла в требуемых точках по азимуту на время, равное времени измерения цифрового вольтметра. В противном случае, из-за больших градиентов поля, ошибка измерения цифрового вольт-

метра возросла бы до недопустимой величины. Запоминание э.д.с. Холла производится на емкости, подключаемой ко входу цифрового вольтметра.

К числу основных источников погрешностей, вносимых аппаратурой автоматизированного стенда дополнительно к погрешностям ручного способа измерения поля, относятся:

1/ разряд запоминающей емкости за время измерения цифрового вольтметра (для вольтметра ДМ-2010 время измерения составляет около 0,5 сек.) - δ_p ,

2/ интегрирование э.д.с. Холла на запоминающей емкости в промежутки времени, когда датчик поля подключен ко входу цифрового вольтметра - δ_z ,

3/ нестабильность порога дискриминации в оптико-механическом устройстве, фиксирующем азимутальное положение датчика поля - δ_t ,

4/ нестабильность скорости вращения приводного электродвигателя при конечном времени срабатывания реле, отключающего вход цифрового вольтметра от датчика поля, создает ошибку - $\delta_{реле}$
Каждая из перечисленных ошибок оценивалась отдельно, а также была посчитана суммарная ошибка, вносимая аппаратурой автоматизированного стенда по формуле:

$$\sigma_{\Sigma \text{авт}} = \sqrt{\delta_z^2 + \delta_p^2 + \delta_t^2 + \delta_{реле}^2} \quad (I)$$

Экспериментальная проверка подтвердила правильность теоретической оценки суммарной ошибки, что позволило сделать вывод о том, что автоматизированный стенд практически не ухудшает точности ручных измерений поля, существенно увеличивая надежность и скорость их выполнения. Разработанный стенд применялся для измерений поля на модели магнитной системы установки "Ф" /4/ и показал высокую эффективность в работе.

2. Обработка результатов измерения магнитного поля изохронного циклотрона на ЭВМ.

Поскольку организация гармонического анализа данных от магнитных измерений "на линии" с ЭВМ позволяет резко увеличить эффективность обработки информации о поле, было принято решение о создании для проектировавшегося в 1962 г. релятивистского циклотрона специализированной ЭВМ, основная задача которой состояла бы в гармоническом анализе данных, получаемых в процессе магнитных измерений. Построенная в 1966 г. ЭВМ была успешно использована при шиммировании магнитного поля электронной модели кольцевого циклотрона с жесткой фокусировкой в 1967 г.

Для гармонического анализа кривой азимутального распределения магнитного поля, заданной отдельными точками, целесообразно использовать, применительно к малым ЭВМ, формулы Бесселя, которые получают при вычислении интегралов в формулах Фурье-анализа по приближенной формуле трапеций:

$$\left\{ \begin{aligned} H_0 &= \frac{1}{2V} \sum_{\lambda=1}^{2V} H_{\lambda} \\ A_k &= \frac{1}{V} \sum_{\lambda=1}^{2V} H_{\lambda} \cos k \frac{\pi}{V} \cdot \lambda \\ B_k &= \frac{1}{V} \sum_{\lambda=1}^{2V} H_{\lambda} \sin k \frac{\pi}{V} \cdot \lambda \end{aligned} \right. \quad (2)$$

где: H_{λ} - измеренная в отдельных точках функция азимутального распределения поля $H_2(\varphi)_{\varphi=\varphi_i}$, k - номер гармоники, $2V$ - число точек измерения по азимуту на некотором радиусе, H_0 - среднее поле ускорителя на данном радиусе.

Амплитуда и фаза k -ой гармоники вычисляются по формулам:

$$\left\{ \begin{aligned} H_{mk} &= \sqrt{A_k^2 + B_k^2} \\ \varphi_{mk} &= \arctg \frac{A_k}{B_k} \end{aligned} \right. \quad (3)$$

Ошибка в коэффициентах Фурье из-за приближенного вычисления интегралов может быть оценена по формуле:

$$\begin{aligned} A'_k &= A_k - (A_{2V-k} + A_{2V+k}) - (A_{4V-k} + A_{4V+k}) - \dots \\ B'_k &= B_k + (B_{2V-k} - B_{2V+k}) + (B_{4V-k} - B_{4V+k}) + \dots \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь A_k, B_k - приближенные значения коэффициентов Фурье, найденные по формулам Бесселя, A'_k, B'_k - точные значения коэффициентов Фурье. Из формул (4) следует, что формулы Бесселя дадут хорошую точность гармонического анализа уже при числе точек измерения на данном радиусе, равном нескольким десяткам, поскольку известно, что амплитуды гармоник в реальных магнитных системах изохронных машин быстро убывают с ростом порядка гармоники.

Для эффективности эксплуатации был принят следующий набор числа точек измерения на одном радиусе: 24, 36, 48, 72, 144. При этом предполагалось выделять из функции $H_2(\varphi)_{\varphi=\varphi_i}$ гармоники следующих порядков: 1, 2, 3, 4, 6, 8.

ЭВМ была построена на цифровом принципе счета, поскольку требования на точность выделения среднего поля составляли $2 \cdot 10^{-4}$.

Основные характеристики анализатора гармоник:

Адресность	-	2
Способ представления чисел в машине	-	с фиксированной запятой
Длина слова	-	22 двоичных разряда
МОЗУ	-	на ферритовых сердечниках (2 кассеты от ЭВМ типа М-20), емкость 165 слов
Постоянное запоминающее устройство	-	диодного типа, емкость 176 чисел
Блок образования значения синусов и косинусов	-	память с временем выборки, удвоенным по сравнению с выборкой из МОЗУ.

- Арифметическое устройство - параллельного типа, 22-х разрядное.
- Устройство управления - смешанного типа.
- Устройство ввода - а) клавиатура пульта управления, б) входной канал для непосредственной связи с измерителем поля.
- Устройство вывода - печатающая машинка типа ЭУМ-46ДП (скорость печати 7 зн/сек).

Тактовая частота генератора главных импульсов равна 20 Кгц. Время счета амплитуды и фазы одной гармоники по 144 точкам составляет около 3 сек. Все блоки ЦАГ выполнены на полупроводниковых элементах. Конструктивно они объединены в стойку размером 180смх180смх50см.

3. Теория фазового движения в изохронных циклотронах и эксперименты по коррекции фазы пролета.

Обобщенная формула связи между магнитным полем и фазовым движением в нем выглядит следующим образом:

$$\frac{dh}{dr} = \frac{h}{r} \left\{ \frac{v_{co}^2 e V_0}{2\pi q E_0 (1+b) \cdot h \cdot r \cdot \lambda} \cdot \frac{d\varphi}{dr} \cdot \cos \varphi - \frac{h \lambda}{(1+b) \sqrt{1 + \left(\frac{r \lambda}{r_{co}}\right)^2}} + \frac{v_{co} \Delta \omega_0}{c q} - \frac{r}{\lambda} \cdot \frac{d\lambda}{dr} - 1 \right\} \quad (5)$$

обратная формула имеет вид:

$$\left[\sin(\varphi_H + \Delta\varphi_H) - \sin \varphi_H \right] = \frac{2\pi q E_0}{v_{co}^2 e V_0} \cdot \int_{r_H}^r \frac{r}{(1+b) h \lambda} \cdot \left[1 - \frac{h \lambda}{(1+b) \sqrt{1 + \left(\frac{r \lambda}{r_{co}}\right)^2}} + \frac{v_{co} \Delta \omega_0}{c q} \right] \cdot \left[1 + \frac{r}{h} \cdot \frac{dh}{dr} + \frac{r}{\lambda} \cdot \frac{d\lambda}{dr} \right] \cdot r \cdot dr \quad (6)$$

Здесь: $h = \frac{H}{H_0}$.

λ - коэффициент, вычисляемый как: $\lambda = \frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{B^2}{2\pi^2} \left(1.5 + n + \frac{r}{6} \cdot \frac{d\lambda}{dr} \right)}$

b - коэффициент, определяемый по формуле: $b = \frac{1}{4} \cdot \frac{B^2 N^2}{\lambda^2 (N^2 - 1 - n)^2}$;

$\Delta \omega_0$ - отличие частоты ускоряющего напряжения от $q \omega_{H_0}$, где: $\omega_{H_0} = \frac{c}{r_{co}}$.

При численном решении уравнения (5) возникают трудности, связанные с наличием полюса в правой части данного уравнения при $h = h_s$ и $\Delta \omega_0 = 0$, а также с наличием численной неустойчивости в зоне радиусов, где функция $\frac{d\varphi}{dr} > 0$.

Численное решение уравнения (5) можно несколько упростить путем разложения поля в ряд около синхронного h_s . Сохраняя только линейный член ряда, имеем: $h = h_s + \Delta h$ и тогда из (5) получим:

$$\frac{d(\Delta h)}{dr} = -\frac{h_s}{r} \left\{ \frac{v_{co}^2 e V_0}{2\pi q E_0} \cdot \frac{d\varphi}{dr} \cdot \cos \varphi \cdot \frac{v_s \cdot h_s}{(1+b) r \cdot (\Delta h - \sqrt{1 - \frac{v_s^2}{c^2}} \cdot \frac{\Delta \omega_0 r_{co}}{c q})} + (1 + n_{so}) \cdot \left[1 + \frac{r}{1+b} \cdot \frac{d\lambda}{dr} \right] \right\} \quad (7)$$

где: $n_{so} = \frac{1}{\lambda^2} - 1$, $h_s = \frac{1+b}{\lambda} \frac{v_s}{c}$, $v_s = \sqrt{1 - \left[\frac{(1+b) r}{r_{co}} \right]^2}$.

Процесс численного решения уравнения (7), так же как и уравнения (5), устойчив лишь при $\frac{d\varphi}{dr} < 0$, что легко достигается путем инверсии фазовой зависимости от радиуса в зонах, где $\frac{d\varphi}{dr} > 0$.

Дифференциальное уравнение (7) при выполнении условия $\frac{d(\Delta h)}{dr} \ll \frac{(1+n_{so}) h_s}{r}$ переходит в формулу:

$$\left(\Delta h - \sqrt{1 - \frac{v_s^2}{c^2}} \cdot \frac{v_s \cdot h_s}{c q} \right) = -\frac{v_{co}^2 e V_0}{2\pi q E_0} \cdot \frac{d\varphi}{dr} \cdot \cos \varphi \cdot \frac{h_s}{v_s \cdot (1+b)^2 r \cdot \left[1 + \frac{r}{1+b} \cdot \frac{d\lambda}{dr} \right]} \quad (8)$$

Обратная формула имеет вид:

$$\left[\sin(\varphi_H + \Delta\varphi_H) - \sin \varphi_H \right] = -\frac{2\pi q E_0}{v_{co}^2 e V_0} \cdot \int_{r_H}^r \frac{r}{h_s} \cdot \frac{v_s \cdot (1+b)^2}{\sqrt{1 - \frac{v_s^2}{c^2}}} \cdot \left[1 + \frac{r}{1+b} \cdot \frac{d\lambda}{dr} \right] \cdot r \cdot dr \quad (9)$$

$$\left[1 + \frac{r}{1+b} \cdot \frac{d\lambda}{dr} \right] \cdot \left(\Delta h - \sqrt{1 - \frac{v_s^2}{c^2}} \cdot \frac{v_s \cdot h_s}{c q} \right) \cdot r \cdot dr$$

Формулы (5) и (6) необходимо использовать при расчетах фазового движения, например, в краевых полях ускорителя, где градиент $\frac{d(Ah)}{dr}$ может составлять значительную величину.

Подставляя (8) в формулу $eH(\bar{r}) \cdot \bar{r} \cdot \lambda = \sqrt{W^2 + 2mE_0}$ и полагая $\Delta W_0 = 0$ (т.е. дрейф частоты ускоряющего напряжения считается пренебрежимо малым по сравнению с дрейфом магнитного поля), получаем выражение для среднего радиуса орбиты m -го оборота:

$$\bar{r}_m = \frac{r_{\text{ср}}}{(1+\delta) \cdot \left(1 + \frac{W_0^m}{E_0}\right)} \cdot \left[\sqrt{\frac{W_{m-1}}{E_0} + \left(\frac{W_{m-1}}{E_0}\right)^2} + \frac{r_{\text{ср}} E_0}{2\gamma E_0 (1+\delta)} \left[\frac{d\psi}{dr} \cos\psi(\bar{r}_{m-1}) \right] \right] \quad (10)$$

Здесь: W_0^m - энергия синхронной частицы на m -ом обороте, вычисляемая по формуле: $W_0^m = mE_0 \cos\psi_0$, где ψ_0 - фаза синхронной частицы. Полученная формула для среднего радиуса может быть использована для вычисления энергии произвольной частицы в ступке (например, частицы, имеющей начальную фазу, совпадающую с фазой ц.т. ступки), после прохождения ею некоторого числа оборотов:

$$W = eV_0 \cdot \sum_{m=0}^N \cos\psi(\bar{r}_m) \quad (11)$$

(eV_0 - максимальный набор энергии за оборот, N - номер оборота, на котором вычисляется энергия частицы).

При практическом использовании формулы (11) информация о фазовом движении частицы получается из непосредственных измерений.

Решение задачи приведения зависимости фазы пролета от радиуса к требуемому виду сводится к отысканию корректирующих токовых добавок, выставляемых затем в концентрических обмотках циклотрона. Токовые добавки находятся из условий минимизации функционала следующего вида:

$$F = \sum_{i=1}^N \frac{(\Delta \sin\psi_i^{\text{э}} - \Delta \sin\psi_i^{\text{т}})^2}{\delta_i} \quad (12)$$

где: N - число точек, в которых измерена фаза с ошибкой δ_i

$$\Delta \sin\psi_i^{\text{э}} = \sin\psi_i^{\text{э}} - \sin\psi_0^{\text{э}}$$

$$\Delta \sin\psi_i^{\text{т}} = \sin\psi_i^{\text{т}} - \sin\psi_0^{\text{т}}$$

($\psi_i^{\text{э}}$ - экспериментально измеренные значения фазы пролета в различных точках по радиусу;

$\psi_i^{\text{т}}$ - фазы пролета в тех же точках по радиусу, что и $\psi_i^{\text{э}}$, но полученные расчетным путем по формуле (9)).

В экспериментах по коррекции фазы пролета, проводившихся на ЭМКЦ в 1970-1973 гг., для нахождения минимума функционала F использовался метод скорейшего спуска. Расчет корректирующих токовых добавок производился на ЭВМ М-6000. Время счета в случае использования 17 корректирующих катушек и измерения фазы в 32 точках по радиусу составило примерно 50 сек., тогда как при использовании 8 катушек коррекции и 12 точек измерения фазы - порядка 5 сек. Зависимость фазы от радиуса в первых экспериментах по коррекции измерялась с помощью методики, основанной на перехвате пучка мишенью и измерений фазового сдвига между сигналом с мишени и ускоряющим напряжением ^{13/}. Точность измерения $\pm(3-5)^0$.

В экспериментах 1974 г. фаза пролета измерялась индуктивными пикап-электродами без нарушения процесса ускорения ^{17/} с точностью около $3-5^0$.

Экспериментально были получены три различных типа фазовой зависимости вдоль радиуса:

а) $\psi(r) = \psi_0 = \text{const}$ (рис. 1)

б) $\psi_{\text{иск}}(r) \rightarrow \psi_{\text{зад}}(r)$ (рис. 2)

в) $\Delta\psi_{\text{сдвига}} \rightarrow 0^0$ (рис. 3)

Зависимости а) и б) были получены с точностью $\pm(3-5)^0$. В режиме в) было достигнуто примерно двукратное уменьшение азимутальной протяженности ступков путем приведения фазы края ступка в область замедляющих фаз. Азимутальная протяженность ступка определялась с помощью осциллографа Н/Р-140А, на котором измерялась длительность

импульса, снимаемого с мишени, укрепленной на пробнике в камере ускорителя.

Поскольку эффективность метода скорейшего спуска значительно снижается при поиске минимумов функционалов, нелинейно зависящих от искоемых параметров, был разработан алгоритм минимизации многопараметрических функционалов, основанный на методах случайного поиска ^{/14/}. Проверка этого алгоритма с помощью численного моделирования на ЭВМ БЭСМ-6 показала, что время отыскания минимума нелинейного функционала методами случайного поиска при больших отклонениях исходной фазовой зависимости от требуемого вида сравнимо со временем поиска минимума методом скорейшего спуска, тогда как в случае малых отклонений фазы от требуемого вида методы случайного поиска позволяют находить решение быстрее, чем метод скорейшего спуска.

Для увеличения эффективности работы системы коррекции фазы пролета разработан алгоритм восстановления отклонений поля от изохронного закона по измеренной зависимости фазы пролета от радиуса ^{/15/}. Алгоритм использует формулу:

$$\Delta h = - \frac{4e^2 V_0}{249 E_0} \cdot \frac{\cos \varphi(z) \cdot \frac{d\varphi}{dz}}{k_R \cdot r \cdot \left[1 + \frac{4G_R'}{1+k_R} \right]} \quad (13)$$

Расчет по формуле (13) связан с необходимостью вычисления с достаточной точностью производных $\frac{d\varphi}{dz}$ от функции $\varphi(z)$, заданной набором дискретных значений. Найдено, что интерполирование и численное дифференцирование функции, заданной набором дискретных точек, наилучшим образом позволяют осуществлять сплайн-функции различного типа, в частности, в алгоритме восстановления поля по фазе был использован кубический сплайн, давший возможность получать первую и вторую производные от интерполирующей функции, непрерывные во всем интервале интерполирования. Программа интерполяции с помощью кубичес-

кого сплайна включена в библиотеку стандартных программ ЭВМ БЭСМ-6 вычислительного центра ОИЯИ ^{/16/}.

4. Анализ причин энергетического разброса и способы его уменьшения в пучке, выводимом из изохронного циклотрона.

В связи с разработкой в 1968-69 гг. в Отделе новых ускорителей Лаборатории ядерных проблем проекта моноэнергетического циклотрона (установка М.Ц.) ^{/9/}, проводились работы по изучению причин возникновения и способов уменьшения энергетического разброса в пучке, выводимом из ускорителя, а также была разработана методика оценки допусков на точность шиммирования и стабилизации магнитного поля на этапе проектирования изохронного циклотрона, базирующаяся на методе статистических испытаний. Сущность методики заключается в следующем. Так как реальное поле, сформированное на ускорителе, является продуктом взаимодействия многих величин, каждая из которых подвержена случайным флуктуациям, имеющим, вообще говоря, произвольный закон распределения, был принят нормальный закон распределения отклонений поля от изохронного закона. Для имитации одной случайной зависимости по радиусу на расстояниях, равных половине зазора между полюсами магнитной системы, наносятся нормированные к реальному полю случайные величины с некоторым выбранным значением $\sigma_{\Delta h}$. Полученная картина поля обрабатывается в соответствии с формулами (9-11). "Разыгрывая" достаточное количество случайных картин поля, можно построить на конечных радиусах ускорителя гистограммы распределения энергии пучка, а также гистограммы распределения фазы пролета во всем диапазоне радиусов ускорения (рис. 4). Если задаться допустимой величиной либо разброса энергии на конечных радиусах, либо максимальным допустимым разбросом фазы пролета во всем диапазоне радиусов ускорения, можно из полученных гистограмм находить перечисленные выше характеристики магнитного поля ускорителя.

Основные результаты, полученные в диссертационной работе, сводятся к следующему:

1. Для увеличения скорости измерения магнитного поля в ускорителях с пространственной вариацией разработан стенд, осуществляющий автоматическое измерение азимутального распределения поля на заданном радиусе. Время измерения поля на одном радиусе по 144 точкам составляет около 5 мин. Информация, получаемая стендом в процессе магнитных измерений, записывается на перфоленту для возможности ее дальнейшей обработки на ЭВМ и, при необходимости визуального контроля, печатается на машинке ЭУМ-46ДП. Добавочная ошибка, вносимая аппаратурой стенда в измерение среднего поля, не превышает $4 \cdot 10^{-5}$, в измерения амплитуд гармоник $5 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{H}{2.00}$, что практически не ухудшает точности измерений, имевшей место при "ручном" измерении поля. Скорость и надежность измерений возросли примерно на порядок.

Автоматизированный стенд использовался при шиммировании магнитного поля модели магнитной системы установки "Ф".

2. Для проектировавшегося в 1962 г. в Лаборатории ядерных проблем релятивистского циклотрона была создана в течение 1962-66 гг. специализированная ЭВМ-анализатор гармоник, предназначенный для гармонического анализа данных, получаемых в процессе магнитных измерений на линии с измерителями поля. Анализатор гармоник является двух-адресной цифровой машиной, оперирующей с числами с запятой, фиксированной после знакового разряда. Длина слова - 22 двоичных разряда. Время счета амплитуды и фазы одной гармоники по 144 точкам составляет примерно 3 сек., что намного меньше времени измерения поля на одном радиусе.

Применение анализатора гармоник при шиммировании поля на электронной модели кольцевого циклотрона в 1967 г. позволило провести этот процесс в предельно сжатые сроки.

3. Выведены обобщенные расчетные соотношения, связывающие дви-

жение фазы пролета ступка с зависимостью магнитного поля ускорителя от радиуса. Полученные соотношения пригодны как для полей с большой ($\delta > I$), так и с малой глубиной вариации ($\delta < I$) и могут быть использованы в случае, когда $\Delta r = \frac{r}{h} \cdot \frac{d(Ah)}{dr} = (0,3 \pm 0,5)$ (например, в крайних полях ускорителей).

4. Приводится методика расчета конечной энергии частицы с учетом фазового движения.

5. Разработаны алгоритмы для коррекции фазы пролета, а также для восстановления зависимости среднего поля от радиуса в процессе ускорения по измеряемой зависимости фазы пролета ступка от радиуса.

6. Проведены эксперименты по коррекции фазы пролета на ЭМКЦ. Исходные фазовые зависимости приводились к требуемому виду с точностью $\pm (3-5)^\circ$. Получено двукратное уменьшение азимутальной протяженности ступка за счет организации такого вида $\varphi(r)$, при котором край ступка заходит в область замедляющих фаз на некоторых радиусах.

7. Предложена методика для оценки допусков на точность шиммирования и стабилизации магнитного поля, а также для выбора числа корректирующих катушек на этапе проектирования ускорителя. В основе методики лежит способ статистических испытаний. Допуски на перечисленные выше характеристики магнитного поля находятся, исходя либо из заданного максимального разброса фазы пролета во всем диапазоне радиусов ускорения, либо из заданного разброса энергии на конечном радиусе ускорения. Проверка методики проводилась с помощью численного моделирования на ЭВМ БЭСМ-6 для проектов моноэнергетического циклотрона и циклотрона У-120М.

Основные результаты, приведенные в диссертации, доложены на всесоюзных конференциях по ускорителям /II, 15/, а также опубликованы в 7 печатных работах /10-16/.

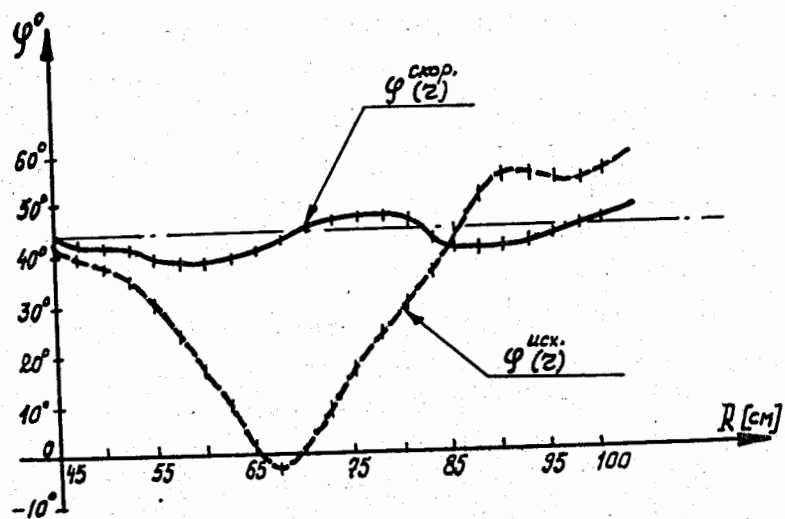


Рис. 1. Коррекция исходной фазы к виду: $\varphi(r) = \varphi_0 = \text{const.}$

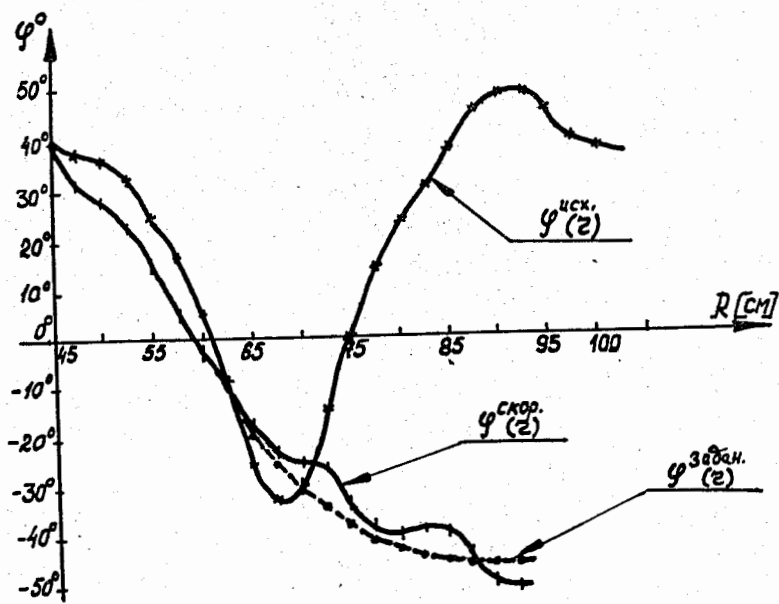


Рис. 2. Коррекция исходной фазы к заданной зависимости.

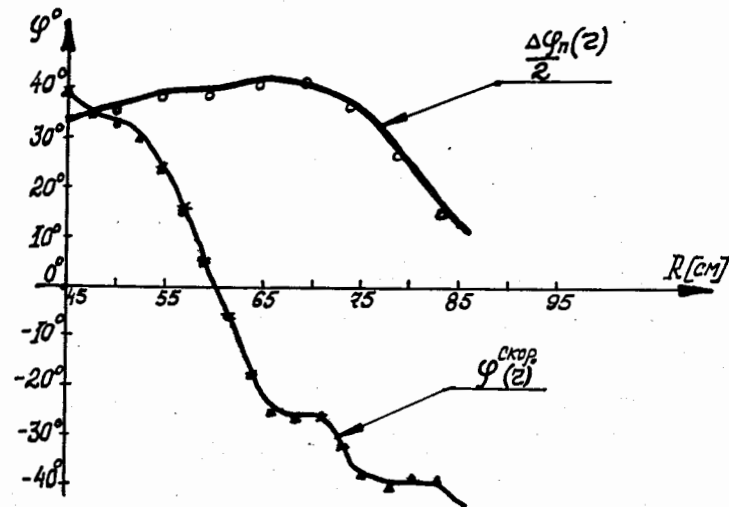


Рис. 3. Изменение азимутальной протяженности сгустка путем создания задержки фазы на некотором радиусе.

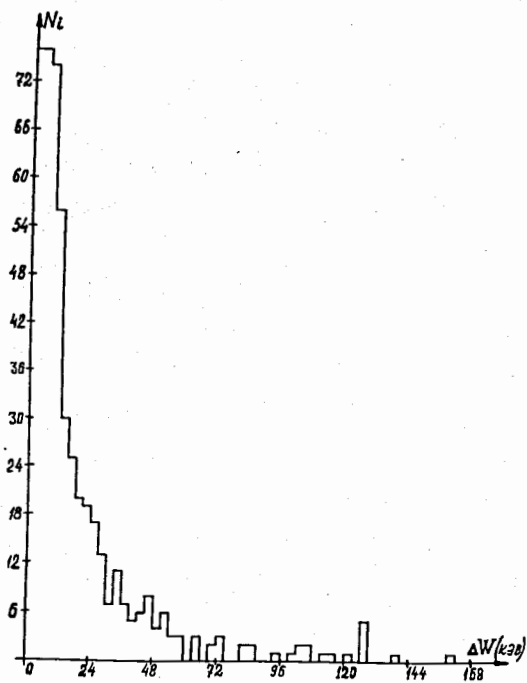


Рис. 4. Функция плотности вероятности для разброса энергии ц.т. сгустка на конечном радиусе при $\epsilon_{\Delta H}^2 = 18$ (циклотрон У-120М), $W_K = 39$ МэВ

Литература:

- I. CERN Courier, No.2, Vol. 14, 1974, 55.
2. CERN Courier, No.1, Vol. 15, 1975, 11.
3. А.А.Глазов, Ю.Н.Денисов, В.П.Джелепов и др. и др. Труды международной конференции по ускорителям. М., 1963, Госатомиздат, 547.
4. В.П.Джелепов, А.А.Глазов и др. Препринт ОИЯИ, 9-3951, Дубна, 1968.
5. И.С.Березин, Н.П.Жидков. Методы вычислений. Ч.1., Физматгиз, 1962.
6. М.Г.Серебрянников. Гармонический анализ. Гостехиздат, 1948.
7. В.Н.Аносов и др. Препринт ОИЯИ, Р9-7339, Дубна, 1973.
8. J.D.Young, NS-16, 3, 1969, part 1, p.762.
9. А.А.Глазов и др. Препринт ОИЯИ, Р9-3932, Дубна, 1968.
10. В.Н.Аносов, Ю.Н.Денисов, П.Т.Шишлянников. Препринт ОИЯИ, 10-4930, Дубна, 1970.
11. В.Н.Аносов, Ю.Н.Денисов и др. Препринт ОИЯИ, 10-3002-1, Дубна, 1966; В.Н.Аносов и др., ПТЭ, 3, 1968, 224;
В.Н.Аносов и др. Труды всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Москва, 9-16 октября 1968 г., М., 1970, ВИНТИ, 669.
12. В.Н.Аносов, Ю.Н.Денисов, В.П.Дмитриевский, В.В.Кольга. Препринт ОИЯИ, 9-8496, Дубна, 1974.
13. В.Н.Аносов и др. Препринт ОИЯИ, Р9-5873, Дубна, 1971.
14. В.Н.Аносов. Препринт ОИЯИ, 9-8422, Дубна, 1974.
15. В.Н.Аносов и др. "Материалы II рабочего совещания по изохронному циклотрону У-120 М", ОИЯИ, Р9-6241, Дубна, 1972, 101.
16. В.Н.Аносов. Дополнение к системе библиотечных программ на ФОРТРАНе, т.1, ОИЯИ, Б1-11-6805, Дубна, 1972.

Рукопись поступила в издательский отдел
10 марта 1975 г.