

сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна

5514 / 2-81

9/4-81
9-81-570

Ю.Д.Безногих, А.Г.Бонч-Осмоловский,
М.А.Воеводин, В.И.Волков, Л.П.Зиновьев,
И.И.Куликов

ИССЛЕДОВАНИЕ
НЕОДНОРОДНОСТЕЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ
СИНХРОФАЗОТРОНА.
О ДИНАМИКЕ ПУЧКА
МАЛОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

Исследование динамики ускоряемого пучка в камере синхροфазотрона /СФ/, а также работа по программе повышения интенсивности ускоряемых частиц связаны с изучением основных характеристик магнитного поля /МП/ ускорителя. В работах /1-3, 8/ было показано, что наличие азимутальных вариаций производных МП по радиусу $\partial V_z / \partial r$; $\partial^2 V_z / \partial r^2$ и т.д. / является одной из причин потерь частиц в начале процесса ускорения за счет действия нелинейных резонансов связи 2,3 и даже 4-го порядков. В настоящей работе приводятся основные результаты измерения показателя неоднородности "п" магнитного поля СФ, описывается методика определения производных "п", их азимутальных гармоник, а также обсуждаются вопросы, связанные с динамикой пучка в камере синхροфазотрона.

В связи с тем, что СФ имеет небольшую величину градиента МП /например, для поля инжекции $V_{инж.} = 0,023$ Т градиент $\partial V_z / \partial r = 5,35 \cdot 10^{-4}$ Т/м/, при определении "п" необходимо учитывать поправку, вносимую градиентом остаточного МП.

$$n = \frac{R_0}{V_0} \left(\frac{\partial V_{дин.}}{\partial r} + \frac{\partial V_{ост.}}{\partial r} \right) = n_d + \Delta n_{ост.}, \quad /1/$$

где $\frac{\partial V_{дин.}}{\partial r}$ и $\frac{\partial V_{ост.}}{\partial r}$ - градиенты динамического и остаточного МП ускорителя, V_0 - магнитное поле на равновесном радиусе R_0 .

Зависимость величины остаточного МП для одного из полюсов магнита от величины тока размагничивания представлена на рис.1. Для СФ градиент $\partial V_{ост.} / \partial r$ имеет зависимость от радиуса, обратную той зависимости $\partial V_{дин.} / \partial r$, которая обусловлена динамическим эффектом /4/, поэтому при определенном токе размагничивания можно достичь частичной компенсации динамических искажений "п" в некоторой области рабочих индукций. На рис.2 представлены зависимости $\Delta n_{ост.}$ на различных полюсах при однократном цикле размагничивания током 300 А. Усредненная зависимость $\Delta n_{ост.} = f(r)$ изображена пунктирной линией. Измерения показали, что при токе размагничивания 300 А характер зависимости $\Delta n_{ост.} = f(r)$ близок к тому, чтобы компенсировать динамические искажения "п" в области магнитного поля инжекции.

Измерения распределения остаточного МП в зазоре магнита проводились с помощью магнитометра с использованием гальвано-

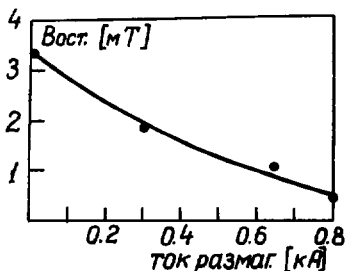
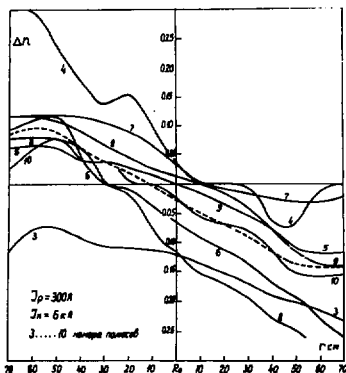


Рис.2. Зависимость показателя неоднородности, обусловленного градиентом остаточного МП синхрофазотрона, приведенного к полю инжекции.

Рис.1. Зависимость величины остаточного магнитного поля СФ от тока при однократном цикле размагничивания.



магниторекомбинационного преобразователя^{/5/}. Исследование динамического значения " n_d " осуществлялось с помощью многоканальной автоматизированной системы, работающей на линии с ЭВМ ЕС-1010^{/6/}. В качестве датчиков использовались индукционные преобразователи, обладающие высокой чувствительностью и избирательностью к градиенту МП^{/7/}.

Измерения динамического показателя неоднородности МП были произведены в 180 точках азимута ускорителя в центрах магнитных полюсов, при восьми значениях индукций /0,023; 0,06; 0,15; 0,3; 0,5; 0,75; 1,0; 1,2/Т. В радиальном направлении десять датчиков располагались с шагом 12 см в пределах рабочей области ± 54 см. Измеренные значения " n_d " в удобной форме представлялись оператору и записывались на магнитную ленту для последующей обработки. Для определения азимутальной зависимости показателя неоднородности МП были произведены измерения " n_d " с шагом 5 см на участке магнита, состоящего из трех полюсов. На рис.3 представлены зависимости $n_d = f(\theta)$ / θ - азимут ускорителя/ для трех значений индукций на трех радиусах ускорителя. Из рисунка видно, что величина " n_d " зависит не только от азимута ускорителя, но и от величины магнитного поля и рабочего радиуса. Это обстоятельство было учтено при последующей обработке данных.

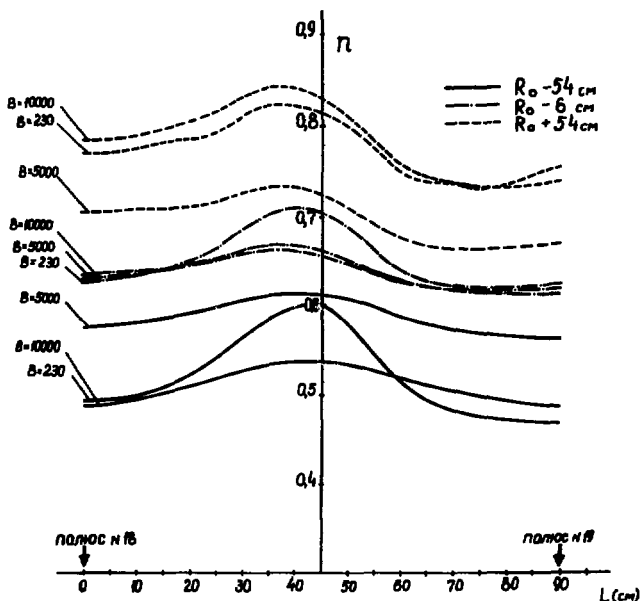


Рис.3. Азимутальное распределение зависимости показателя неоднородности магнитного поля синхрофазотрона между двумя полюсами на трех радиусах ускорителя и трех значениях величины магнитного поля $B = 0,023 \text{ T}$; $0,5 \text{ T}$ и $1,0 \text{ T}$.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ "n"

Измеренные данные записывались на магнитную ленту в виде блоков /рис.4/, включающих информацию об "n" на одном азимуте ускорителя для десяти радиальных точек при восьми значениях магнитной индукции. В начале каждого блока содержатся номера квадранта, полюса и координата в пределах данного полюса, по которым осуществляется поиск необходимой информации.

Обработка записанных на магнитную ленту данных производится с помощью трех программ и сводится к вычислению производных $\frac{\partial n}{\partial r}$; $\frac{\partial^2 n}{\partial r^2}$ и $\frac{\partial^3 n}{\partial r^3}$ для всех измеренных значений показателя неоднородности /программа DERVMF /, определению азиму-

тальных гармоник указанных "n" и его производных / HARMMF, а также формированию входного файла данных для первых двух программ (DSPMF). Ниже приводится их краткое описание.

1. Программа DSPMF

Эта программа служит для выполнения определенных операций с данными, записанными на магнитную ленту во время проведения измерений "n". Заявки на выполнение операций подаются с операторской консоли в виде приказов, в которых указывается тип операции и при необходимости - дополнительные параметры. Выдачей символа (*) ЭВМ оповещает оператора о готовности к приему приказа, а знаком "Возврат каретки" заканчивается командная строка. При выполнении операций, требующих поиска информации, относящейся к определенной азимутальной точке ускорителя, дополнительно в режим ответов на вопросы ЭВМ задаются номера квадранта, магнитного полюса и координата в пределах полюса. Программа предоставляет оператору следующие услуги:

1. *RD - поиск на магнитной ленте и считывание в оперативную память ЭВМ блока данных, включающего информацию об "n" в заданной азимутальной точке ускорителя.

2. *LPi - вывод на печать или алфавитно-цифровой дисплей в числовом виде значений "n" на заданном азимуте ускорителя.
i = 0 - вывод значений "n" при всех рабочих значениях В,
i = 1÷8 - указывает порядковый номер рабочей индукции В соответственно /0,023; 0,06; 0,15; 0,3; 0,5; 0,75; 1,0; 1,2/Т, для которых необходимо выводить информацию об "n".

3. *GDi - представление на экране графического дисплея GD-71 данных об "n" на заданном азимуте в виде графиков $n = f(r)$; r - радиальная координата камеры ускорителя.

4. *SDi - то же, что и в приказе 3, но графики представляются на экране графического дисплея Tektronix-611.

5. *PLi - построение графиков функций $n = f(r)$ с помощью графопостроителя HP7210A.

6. *MOj - модификация значения "n" на радиусе ускорителя $r = R_0 + 12j$ - 54 см при заданном значении В, j - номер датчика /крайний на внутреннем радиусе датчик имеет порядковый номер 1/.

7. *MU - выполнение операции $n = p + q_1 n$ для всех значений "n" блока данных, считанного в ОЗУ ЭВМ, где q_1 - калибровочная константа.

Содержимое Адрес

Номер серии измерений	0
Номер блока записи	2
Номер квадранта	4
Номер полюса	6
Координата в пределах полюса	8
Положение платформы	10
В1	12
П1	14
⋮	
П10	32
⋮	
Вс	166
П1	168
⋮	
П10	186

Рис. 4. Формат блока записи на магнитную ленту.

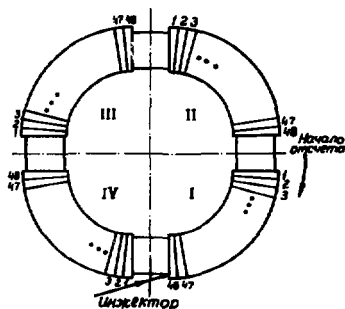


Рис. 5. Схема синхрофазотрона, поясняющая нумерацию полюсов, квадрантов, а также определяющая начало отсчета при вычислении азимутальных гармоник и топографии показателя неоднородности МП.

8. *AV - усреднение значений "п" в заданном количестве S полюсов, т.е. выполнение операции $\bar{n} = \sum_{m=1}^S n_m / S$.

9. *MK - вычисление коэффициента для учета азимутальной зависимости "п", т.е. определение для всех радиусов ускорителя и значений рабочих индукций магнитного поля коэффициентов $q_2 = \frac{\bar{n} - n}{\bar{n}}$, где n - измеренное значение показателя неоднородности в центре магнитного полюса.

10. *MD - выполнение операции $n = n + q_2 n$ для всех значений "п" выбранного блока данных.

11. *LK - распечатка величины коэффициентов q_2 .

12. *WD - запись блока данных из ОЗУ ЭВМ на магнитную ленту.

При введении неправильного приказа или недопустимой величины дополнительных параметров выдается сообщение об ошибке.

В каждом квадранте ускорителя имеются области, недоступные для измерений в автоматическом режиме. Например, платформа с датчиками не может переместиться к 2-3 крайним полюсам каждого квадранта. В связи с этим при формировании входных данных программ DERVMF и HARMMF для указанных полюсов брались усредненные по квадранту значения "n".

2. Программа DERVMF

При аналитическом рассмотрении динамики частиц в камере ускорителя важно знание азимутальных гармоник не только показателя неоднородности магнитного поля, но и его производных по радиусу. Практический интерес представляют производные до 3-го порядка включительно. Программа DERVMF предназначена для вычисления указанных производных.

Производные "n" в крайних точках и на внутренних радиусах определялись разностным методом соответственно по формулам:

$$\frac{\partial n(r_1)}{\partial r_1} = \frac{n(r_2) - n(r_1)}{\Delta r}; \quad \frac{\partial n(r_{10})}{\partial r_{10}} = \frac{n(r_{10}) - n(r_9)}{\Delta r}, \quad /2/$$

$$\frac{\partial n(r_i)}{\partial r_i} = \frac{n(r_{i+1}) - n(r_{i-1}))}{2\Delta r}, \quad i = 2, 3, \dots, 9, \quad /3/$$

где $\Delta r = 12$ см - расстояние между соседними датчиками.

Производные более высокого порядка определялись аналогично.

Погрешность измерения n_d не превышала 1% для индукции 0,023 Т и 0,5% - для индукций выше 0,023 Т. Максимальная абсолютная погрешность при определении производных показателя неоднородности МП оценивалась по формуле:

$$\delta\left(\frac{\partial^m n}{\partial r^m}\right) = \frac{2\delta(\partial^{m-1} n / \partial r^{m-1})}{\Delta r} \quad /4/$$

и составила для первой, второй и третьей производных соответственно: $5,4 \cdot 10^{-4}$ 1/см; $8,5 \cdot 10^{-5}$ 1/см²; $1,4 \cdot 10^{-5}$ 1/см³. Вычисленные значения производных каждого порядка в виде отдельных файлов данных записывались на магнитную ленту и в качестве входных использовались программой HARMMF.

3. Программа HARMMF

Входные файлы данных программы гармонического анализа учитывают также значения "n" в прямолинейных промежутках ускорителя, которые взяты нулевыми. Окончательный сформированный

файл содержит 232 блока записи, соответствующих значениям показателя неоднородности в 232 азимутальных точках ускорителя с расстоянием между двумя соседними 89 см. При гармоническом анализе за начало отсчета принята середина 2-го прямолинейного промежутка /рис.5/.

Программа **HARMMF** позволяет вычислять коэффициенты ряда Фурье до 4-го порядка включительно. При вычислении этих коэффициентов использовались формулы Бесселя для приближенного гармонического анализа:

$$a_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} y_i, \quad /5/$$

$$a_k = \frac{2}{N} \sum_{i=0}^{N-1} y_i \cos(k\theta_i), \quad /6/$$

$$b_k = \frac{2}{N} \sum_{i=0}^{N-1} y_i \sin(k\theta_i), \quad /7/$$

где $k = 1, 2, \dots$ - номер гармоники; $N=232$ - число азимутальных точек; $\theta_i = \Delta l / R_{ГЛ}$; $\Delta l = 89$ см - азимутальная протяженность магнитного полюса, $R_{ГЛ} = R_0 + 4L$; $L = 8$ м - длина прямолинейного

промежутка, y_i - значение одного из параметров n_i ; $\frac{\partial n_i}{\partial t}$; $\frac{\partial^2 n_i}{\partial t^2}$; $\frac{\partial^3 n_i}{\partial t^3}$ в i точке азимута ускорителя. Амплитуда Q_k и фаза ϕ_k гармоники определялись соответственно по формулам:

$$Q_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}; \quad \phi_k = \arctg(b_k / a_k).$$

Результаты расчетов в удобной форме выдавались на печать.

В настоящее время по итогам измерений получен большой массив информации о показателе неоднородности МП синхрофазотрона. В него входят: а/ абсолютные значения n , охватывающие практически все полюса магнита СФ /16 тыс. значений/; б/ усредненные по квадрантам 320 значений "н"; в/ азимутальные гармоники "н" по 4-ю включительно /320 значений/; г/ производные $\partial^n n / \partial t^m$ $m = 1, 2, 3$ /38 тыс. значений/; д/ азимутальные гармоники производных "н" /960 значений/.

В качестве иллюстрации приведем некоторые данные. На рис.6 представлено усредненное по четырем квадрантам радиальное распределение для диапазона рабочих индукций от 0,023 Т /кривая 1/ до 1,2 Т /кривая 8/. На рис.7 представлены зависимости $n=f(\Delta R)$ для каждого квадранта при $B = 0,5$ Т. В таблице приведены данные величин азимутальных гармоник производных $\partial^n n / \partial t^m$ для индукции $B = 0,023$ Т в области рабочих радиусов $R_0 \pm 42$ см.

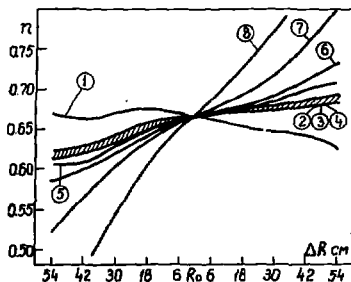
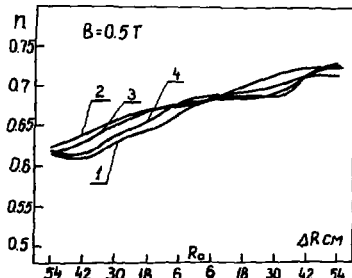


Рис. 7. Радиальное распределение "n" на индукции 0,5 Т отдельно по четырем квадрантам /число указывает номер квадранта/.

Рис. 6. Радиальное распределение "n", усредненное по четырем квадрантам, для диапазона рабочих индукций /1 - 0,023 Т; 2 - 0,06 Т; 3 - 0,15 Т; 4 - 0,3 Т; 5 - 0,05 Т; 6 - 0,75 Т; 7 - 1,0 Т; 8 - 1,2 Т/.



Анализ результатов магнитных измерений позволяет сделать следующие выводы:

1/ Зависимость $n_{\text{д}} = f(r, B)$ носит размытый характер /рис. 8/. Это размытие /разброс/ в величине "n" на центральном радиусе достигает величины $\sim 0,021$ и объясняется влиянием клиновидного воздушного зазора между пакетами железного сердечника магнита ускорителя.

Однако благодаря наличию градиента остаточного магнитного поля, соответствующего току размагничивания 300 А, размытие в зависимости $n = f(r, B)$ в значительной степени уменьшается, что приводит к стабилизации рабочей точки на диаграмме резонансов /рис. 9/.

2/ Минимальная величина первой производной dn/dr , усредненная по четырем квадрантам для полей от 0,06 Т до 0,3 Т, составляет $6,4 \cdot 10^{-4}$ 1/см. Эта величина должна быть учтена при обеспечении оптимальной настройки режима медленного вывода пучка из камеры синхрофазотрона и выборе рабочего радиуса при оптимальной настройке ускорителя.

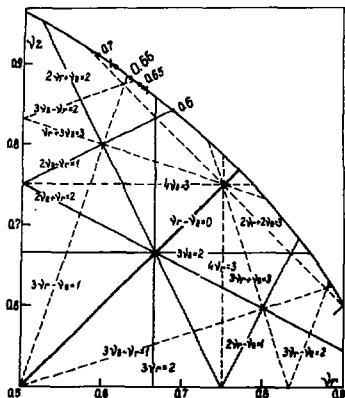
3/ Установлено влияние собранных обмоток резонансного вывода пучка на искажения, вносимые в величину "n".

Так, например, при поле инжекции 0,023 Т это изменение составляет $\Delta n \approx 0,008$. Необходимо отметить, что в настоящее время еще недостаточно изучено влияние собранных корректирующих



Рис.9. Диаграмма резонансов и частот колебаний пучка.

Рис.8. Радиальное распределение "п" в диапазоне рабочих индукций от 0,023 Т до 1,2 Т/на одном из полюсов ускорителя без учета влияния остаточного магнитного поля ускорителя.



обмоток, проводники которых находятся вблизи полюсов магнита, на искажения "п" в диапазоне рабочих индукций.

4/ Наличие восьми сигнальных электродов, находящихся внутри вакуумной камеры для измерения пространственного положения пучка, слабо влияет на общий характер показателя неоднородности МП и его азимутальные гармоники.

ОБСУЖДЕНИЕ ДАННЫХ. О ДИНАМИКЕ ПУЧКА СИНХРОФАЗОТРОНА ПРИ МАЛОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

Проведенные измерения характеристик магнитного поля СФ и их обработка позволяют сделать выводы о возможных источниках потерь как при большой, так и при малой интенсивности ускоряемых в СФ пучков. Ранее, из-за отсутствия таких данных, анализ процессов потерь, происходящих в начальной стадии ускорения при большой интенсивности, делался на основе косвенных данных о магнитном поле по характеристикам коррекций, вводимых в процессе настройки ускорителя, которые давали значительный эффект^{1-3/}. Сравнение таблиц коэффициентов μ_m^k , приведенных

в ^{1/2}, и таблицы данной работы позволяет сделать вывод о том, что принятая ранее процедура была правильной, данные совпадают в пределах порядка величины и погрешностей измерений.

Таблица

Величина азимутальных гармоник $\partial^n n / \partial r^m$ в области рабочих радиусов $R_0 \pm 42$ см для поля инжекции 0,023 Т

m	Радиальная координата	Номер азимутальной гармоники (k)			
		1	2	3	4
0	$R_0 - 42$ см	$0,91 \cdot 10^{-2}$	$0,26 \cdot 10^{-2}$	$7,3 \cdot 10^{-3}$	0,21
	$R_0 - 18$ см	$1 \cdot 10^{-2}$	$4,9 \cdot 10^{-3}$	$6,6 \cdot 10^{-3}$	0,22
	$R_0 - 6$ см	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$2,2 \cdot 10^{-3}$	0,22
	$R_0 + 6$ см	$1,7 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$	0,22
	$R_0 + 18$ см	$4,6 \cdot 10^{-3}$	$1,7 \cdot 10^{-3}$	$3,7 \cdot 10^{-3}$	0,22
	$R_0 + 42$ см	$3,5 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$4,9 \cdot 10^{-3}$	0,22
1	$R_0 - 42$ см	$4,5 \cdot 10^{-4}$	$3,5 \cdot 10^{-4}$	$2,3 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$
	$R_0 - 18$ см	$6,0 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$2,2 \cdot 10^{-4}$	$1,8 \cdot 10^{-4}$
	$R_0 - 6$ см	$4,7 \cdot 10^{-4}$	$1,7 \cdot 10^{-4}$	$2,2 \cdot 10^{-4}$	$1,7 \cdot 10^{-4}$
	$R_0 + 6$ см	$4,7 \cdot 10^{-4}$	$5,3 \cdot 10^{-4}$	$2,2 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-5}$
	$R_0 + 18$ см	$5,1 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$4,3 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$
	$R_0 + 42$ см	$7,7 \cdot 10^{-4}$	$2,1 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$1,8 \cdot 10^{-4}$
2	$R_0 - 42$ см	$2,8 \cdot 10^{-5}$	$2,4 \cdot 10^{-5}$	$2,6 \cdot 10^{-5}$	$1,9 \cdot 10^{-5}$
	$R_0 - 18$ см	$2,6 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-5}$	$8,8 \cdot 10^{-6}$	$1,8 \cdot 10^{-5}$
	$R_0 - 6$ см	$3,9 \cdot 10^{-5}$	$3,9 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-5}$	$0,9 \cdot 10^{-5}$
	$R_0 + 6$ см	$7,4 \cdot 10^{-6}$	$6,8 \cdot 10^{-6}$	$1,1 \cdot 10^{-5}$	$0,9 \cdot 10^{-5}$
	$R_0 + 18$ см	$2,3 \cdot 10^{-5}$	$2,6 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$0,6 \cdot 10^{-5}$
	$R_0 + 42$ см	$2,1 \cdot 10^{-5}$	$1,2 \cdot 10^{-5}$	$2,2 \cdot 10^{-5}$	$2,2 \cdot 10^{-5}$
3	$R_0 - 42$ см	$1,1 \cdot 10^{-6}$	$1,4 \cdot 10^{-6}$	$1,1 \cdot 10^{-6}$	$1,7 \cdot 10^{-6}$
	$R_0 - 18$ см	$2,9 \cdot 10^{-6}$	$2,1 \cdot 10^{-6}$	$1,2 \cdot 10^{-6}$	$8,5 \cdot 10^{-7}$
	$R_0 - 6$ см	$1,2 \cdot 10^{-6}$	$8,7 \cdot 10^{-7}$	$5,4 \cdot 10^{-7}$	$0,9 \cdot 10^{-6}$
	$R_0 + 6$ см	$2,6 \cdot 10^{-6}$	$2,9 \cdot 10^{-6}$	$6,6 \cdot 10^{-7}$	$0,8 \cdot 10^{-6}$
	$R_0 + 18$ см	$2,5 \cdot 10^{-6}$	$9,7 \cdot 10^{-7}$	$1,8 \cdot 10^{-6}$	$0,8 \cdot 10^{-6}$
	$R_0 + 42$ см	$3,0 \cdot 10^{-6}$	$4,7 \cdot 10^{-7}$	$1,2 \cdot 10^{-6}$	$2,2 \cdot 10^{-6}$

Ниже мы остановимся на соображениях, связанных с возможными источниками потерь при малой интенсивности ускоряемых пучков, когда кулоновский сдвиг и его влияние на динамику пучка не существенны. Это происходит при начальном числе ускоряемых частиц: $N \leq 5 \cdot 10^{11}$ част./имп., когда кулоновский сдвиг частот некогерентных колебаний частиц меньше расстояния от рабочей окружности на диаграмме частот ускорителя до полосы потенциально опасного резонанса 4-го порядка $2\nu_r + 2\nu_z = 3$, рассмотренного ранее ^{1/2}.

Рассмотрим детально окрестность рабочей точки ускорителя, которая, согласно данным магнитных измерений, в основном соответствует $n = 0,66$ и частоты которой равны:

$$\nu_x^p = 0,633; \quad \nu_z^p = 0,883. \quad /9/$$

Учитывая радиальный полуразмер сепаратрисы в нормальных условиях, равный $x = 35$ см, получаем $\Delta p/p |_{\max} = 0,43\%$ и, следовательно, согласно формулам /13/ работы /1/, можно вычислить размытие частот колебаний из-за наличия в ускорителе зависимости $n(r)$ /без коррекции/ при $V_0 = 230$ Гс, которой соответствует среднее значение $\overline{\partial n / \partial r}$ при инжекции:

$$\overline{\partial n / \partial r} = -0,47 \cdot 10^{-3} \text{ 1/см.} \quad /10/$$

Таким образом, среднее размытие частот равно:

$$\overline{\Delta \nu_r^{\max}} = \pm 0,021.$$

$$\overline{\Delta \nu_z^{\max}} = \pm 0,015. \quad /11/$$

Данные магнитных измерений показывают, что существуют локальные увеличения $\partial n / \partial r$ на определенных радиусах до величины

$$\partial n / \partial r |_{\max} \approx -0,65 \cdot 10^{-3} \text{ 1/см,}$$

что увеличивает величины /10/ в полтора раза. Размытие частот происходит по дуге окружности на диаграмме частот по обе стороны от рабочей точки $n = 0,66$ /рис.9/. Колебания по отрезку окружности происходят с частотой синхротронных колебаний. Таким образом, за время 1 мс частицы дважды проходят через полосы резонансов связи 4-го порядка:

$$3\nu_r - \nu_z = 1 \quad /12/$$

$$3\nu_z - \nu_r = 2.$$

При некоторых условиях /уменьшение частот рабочей точки или увеличение n' в процессе настройки/ на начальном этапе ускорения может захватываться полоса резонанса медленного вывода:

$$3\nu_r = 2 \quad /13/$$

и, видимо, в особо неблагоприятных случаях, резонанс связи 3-го порядка:

$$2\nu_z - \nu_r = 1. \quad /14/$$

Вопрос о роли резонансов /12/ кратко обсуждался ранее /2/, резонанс /14/ был там же рассмотрен детально. Сейчас мы пока-

жем, что согласно данным магнитных измерений, резонансы связи /12/, непосредственно зависящие от перекоса медианной поверхности ускорителя, не очень опасны и не могут вызывать существенных потерь частиц в начальный период ускорения.

Оба эти резонанса определяются 1-й и 2-й гармониками Фурье производной поля вида

$$\frac{\partial^3 B_x}{\partial x^3} \Big|_{1,2} = z \frac{\partial^4 B_z}{\partial x^4} \Big|_{1,2} = \frac{z \cdot B_0}{R_0} n^3 \Big|_{1,2} . \quad /15/$$

Здесь z - смещение медианной поверхности. Ширины резонансных полос /12/ равны:

$$\Delta_{1,2} \approx a_{r_0} a_{z_0} \cdot z |n^3|_{1,2} . \quad /16/$$

Здесь a_{r_0} , a_{z_0} - начальные амплитуды горизонтальных и вертикальных бетатронных колебаний. Для $|n^3|_{1,2} \approx 0,2 \cdot 10^{-5} \text{ 1/см}^3 / \text{см}$. таблицу / $\Delta_{1,2} \approx 4 \cdot 10^{-4}$ при $z = 2 \text{ см}$, $a_{r_0}, a_{z_0} \approx 10 \text{ см}$.

Далее нетрудно произвести расчет роста амплитуд, например, вертикальных колебаний, за время прохождения полосы резонанса. Максимальный рост амплитуды равен:

$$a_z / a_{z_0} \approx 1 + \frac{\pi}{9} \Delta . \quad /17/$$

Если принять /оценка по максимуму/, что каждое прохождение полосы сопровождается максимальным ростом, то за время, например, 200 мс относительный прирост амплитуды будет:

$$\Delta a_z / a_{z_0} \approx 5 \cdot 10^{-2} .$$

Таким образом, при существующих искажениях магнитного поля в синхрофазотроне /даже без коррекций/ резонансы /12/ не могут вызвать заметных потерь частиц на начальном этапе ускорения = до 100 мс/. Напомним, что эти резонансы различные, т.е. наиболее опасный рост амплитуд z -колебаний ограничен соотношением:

$$\begin{aligned} 3\nu_r - \nu_z &= 1. \quad a_z^2 + 0,24a_r^2 = \text{const} = a_{z_0}^2 + 0,24a_{r_0}^2 . \\ 3\nu_z - \nu_r &= 2. \quad a_z^2 + 2,7a_r^2 = \text{const} . \end{aligned} \quad /18/$$

Как уже отмечалось в /2/, в этом отношении резонанс $2\nu_z - \nu_r = 1$ потенциально более опасен, т.к. он допускает рост a_z амплитуды /при $a_{r_0} = a_{z_0} = 10 \text{ см}$ / вплоть до 20 см, когда частицы теряются на вертикальных стенках камеры.

Если условия в ускорителе таковы, что смещение частот допускает пересечение полосы резонанса $3\nu_r = 2$, немедленно возникнут потери частиц по горизонтали. Используя данные маг-

нитных измерений /напомним, что они получены без коррекций/, находим ширину полосы этого резонанса:

$$\Delta \approx a_{r0} n_1^2 \approx 3 \cdot 10^{-8}$$

и радиальная амплитуда может возрасти в несколько раз уже к 20 мс /за одно прохождение полосы радиальное отклонение частиц увеличивается на $\sim 10\%$. В связи с этим представляют опасность возможные искажения магнитного поля, например, в связи с несовершенством корректирующих обмоток, приводящие к резким локальным уменьшениям показателя спада МП "п" по радиусу и соответствующему росту $|\partial n / \partial r|$. Этот вопрос требует дальнейшего экспериментального изучения.

В заключение можно сделать следующие выводы и рекомендации:

1/ В целом магнитное поле синхрофазотрона находится в неплохом состоянии, и при достаточно аккуратном применении существующих систем коррекций как n_m^k , так и искажений медианной поверхности, способно обеспечить устойчивое ускорение интенсивных пучков заряженных частиц.

2/ При малой интенсивности особо тщательному контролю подлежат значения n /рабочая точка/ и $\partial n / \partial r$. Величину "п" нужно ограничить, фиксируя значением $0,66 \pm_{0,01}^{0,02}$, а $|\partial n / \partial r| \leq 0,3 \cdot 10^{-8}$ 1/см при инжекции и до значения поля 0,06 Т.

3/ Динамической коррекции подлежат первая и вторая гармоники производных магнитного поля по радиусу, особенно $n_1^{1,2}$. При большой интенсивности / $N > 1 \cdot 10^{12}$ част./имп./ добавляется еще и требование коррекции 3-й гармоники Фурье (n_2^3).

4/ В процессе настройки ускорителя следует следить за величинами $\Delta p / p|_{max}$; x_m , а также a_{r0} и a_{z0} .

Авторы выражают благодарность Б.В.Василишину за полезные обсуждения представленных материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Безногих Ю.Д. и др. ОИЯИ, Р9-9115, Дубна, 1975.
2. Безногих Ю.Д. и др. ОИЯИ, Р9-9120, Дубна, 1975.
3. Безногих Ю.Д. и др. ОИЯИ, Р9-11903, Дубна, 1978; Труды VI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1979, т.2, с.136.
4. Журавлев А.А. и др. Ускорители элементарных частиц. Атомиздат, М., 1957, с.15.
5. Воеводин М.А. и др. ПТЭ, 1978, №6, с.143.

6. Воеводин М.А. и др. ОИЯИ, Р9-80-578, Дубна, 1980; Труды VII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1981. ОИЯИ, т.2, с.272.
7. Воеводин М.А. Авт.свид. СССР №631848 от 17.06.76 г. Бюлл. ОИПОТЗ, 1978, №41, с.170.
8. Василишин Б.В. и др. ОИЯИ, Б1-3-8031, Дубна, 1974.

Рукопись поступила в издательский отдел
21 августа 1981 года.