

СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА

5180/82

25/10-82  
9-82-515

В.П.Заболотин, А.С.Исаев, В.Н.Перфеев,  
С.В.Федуков, Д.И.Шерстянов, И.Н.Яловой

ОСТАТОЧНОЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ  
В ЭЛЕКТРОМАГНИТЕ СИНХРОФАЗОТРОНА ОИЯИ  
И ЕГО КОМПЕНСАЦИЯ

1982

## 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Одним из факторов повышения эффективности работы синхрофазотрона является увеличение частоты повторения импульсов. Этого можно достигнуть за счет сокращения паузы между циклами ведущего магнитного поля. Но в каждой паузе осуществлялись пять циклов размагничивания, необходимых для устранения больших искажений в распределении магнитного поля по радиусу и азимуту, вызванных остаточным магнитным полем  $H_0$  /1,2,3,4/. Поэтому целесообразно было исключить систему размагничивания или оставить только один цикл размагничивания, скорректировав искажения от остаточного поля корректирующими обмотками. С этой целью проведены измерения возмущений в магнитном поле  $H = 160 \text{ Э}$ , вносимых остаточным полем, как при отсутствии циклов размагничивания, так и при наличии одного такого цикла.

## 2. МЕТОДИКА И ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЙ

Измерения распределений остаточного магнитного поля  $H_0$  по азимуту и радиусу проводились катушками и баллистическим гальванометром.

Распределение  $H_0$  по радиусу измерялось путем быстрого перемещения катушки на  $\Delta r = 10 \text{ см}$  на выбранном азимуте магнита. Длина катушки равнялась длине полюса по азимуту, а ее постоянная  $S \cdot W = 250000 \text{ см}^2 \times \text{число витков}$ .

Поправка к показателю неоднородности магнитного поля от остаточного поля  $\Delta n_0$  для  $H = 160 \text{ Э}$  относительно уровня  $n = 0,65$

вычисляется следующим образом:  $\Delta n_0 = \frac{\Delta a_0}{a_{\text{ур.}} \cdot k} \cdot \frac{r}{\Delta r} \cdot \frac{H_0}{H}$ , где  $\Delta a_0 =$

$a_{\text{изм.}} - a_{\text{норм.}}$ ;  $a_{\text{изм.}}$  - показание гальванометра, соответствующее  $\Delta H_0$  при быстром перемещении катушки на  $\Delta r = 10 \text{ см}$ ;

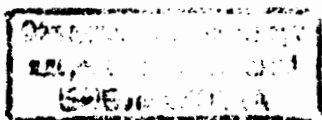
$a_{\text{норм.}} = n \cdot a_{\text{ур.}} \cdot k \cdot \frac{\Delta r}{r}$ ;  $n = 0,65$  - показатель неоднородности

магнитного поля;  $a_{\text{ур.}}$  - показание гальванометра, соответствующее  $H_0$  при повороте катушки на  $180^\circ$ ;  $H_0$  - величина остаточного магнитного поля;  $k$  - коэффициент шунтировки схемы измерения.

Ошибка измерения

$$\frac{\delta \Delta n_0}{\Delta n_0} = \frac{\delta \Delta a_0}{\Delta a_0} + \frac{\delta a_{\text{ур.}}}{a_{\text{ур.}}} + \frac{\delta k}{k} + \frac{\delta r}{r} + \frac{\delta \Delta r}{\Delta r} + 0,1\%$$

обусловлена неточностью поворота катушки на  $180^\circ$ ,  $\frac{\delta \Delta a_0}{\Delta a_0} \leq \pm 0,2\%$ ;



$$\frac{\delta a_{ур.}}{a_{ур.}} \leq \pm 0,2\%; \quad \frac{\delta k}{k} \leq \pm 1,2\%; \quad \frac{\delta r}{r} \leq \pm 0,01\%; \quad \frac{\delta \Delta r}{\Delta r} \leq \pm 0,2\%.$$

Таким образом,  $\frac{\delta H_0}{H_0} \leq 2\%$ .

Измерение распределения остаточного магнитного поля по азимуту производилось посредством поворота катушки на  $180^\circ$  на измеряемом радиусе. Длина катушки равна длине полюса по азимуту, а ее постоянная  $SW=10100 \text{ см}^2 \times \text{число витков}$ .

Измерение остаточного магнитного поля  $H_0$  проводилось на радиусах  $R_0$  и  $R_0 \pm 60 \text{ см}$ .

$$H_0 = \frac{C \cdot a_0}{25W}$$

где  $C = \frac{M \cdot i}{a_c} \cdot 10^8$  - баллистическая постоянная гальванометра;  $a_0$  - показание гальванометра, соответствующее  $H_0$  при повороте катушки на  $180^\circ$ ;  $M=0,01 \text{ Гн}$  - величина взаимной индуктивности эталонной катушки;  $i$  - величина тока /А/, протекающего по эталонной катушке.

Ошибка измерения из-за неточности поворота катушки на  $180^\circ$

$$\frac{\delta H_0}{H_0} = \frac{\delta C}{C} + \frac{\delta a_0}{a_0} + \frac{\delta SW}{SW} + 0,1\%;$$

$$\frac{\delta C}{C} = \frac{\delta i}{i} + \frac{\delta M}{M} + \frac{\delta a_c}{a_c} \leq \pm(0,2\% + 0,1\% + 0,2\%) = \pm 0,5\%;$$

$$\frac{\delta a_0}{a_0} \leq \pm 0,2\%; \quad \frac{\delta SW}{SW} \leq \pm 0,2\%.$$

Таким образом,

$$\frac{\delta H_0}{H_0} \leq \pm 1\%.$$

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

#### А. При отсутствии системы размагничивания

На поле 160 Э измерено распределение по радиусу поправки к показателю неоднородности магнитного поля  $\pi$  от остаточного магнитного поля  $\Delta n_0$  на 17 полюсах магнита в области  $R_0 \pm 60 \text{ см}$  с шагом 10 см и распределение остаточного магнитного поля

$\frac{\Delta H_0}{H=160}$  на каждом полюсе квадранта IV на радиусе  $R_0$ . Данные

этих измерений приведены в табл.1 и 2, из которых видно, что при отсутствии системы размагничивания остаточное магнитное поле вносит большие искажения как в распределение  $\pi$  по радиусу, так и в распределение  $H$  по азимуту. Как видно из табл.3, в этом случае отсутствует захват пучка в режим ускорения.

Таблица 1

$\Delta n_0 = \chi(r)$  относительно  $\pi=0,65$  при отсутствии системы размагничивания /  $i_p=0$  / и при различных режимах ее работы.  $H=160 \text{ Э}$ .

Число циклов размагн.	I					5*
	0	340	500	620	800	
$i_p \text{ А}$	0	340	500	620	800	
$r \text{ см}$						
$H_0 \text{ Э}$	33	17	12	8	5	4
-60	+0,33	+0,09	+0,06	+0,04	+0,02	+0,01
-50	+0,29	+0,08	+0,06	+0,04	+0,02	+0,02
-40	+0,23	+0,07	+0,05	+0,03	+0,02	+0,01
-30	+0,15	+0,06	+0,04	+0,02	+0,01	0
-20	+0,10	+0,04	+0,03	+0,01	+0,01	0
-10	+0,06	+0,03	+0,01	0	0	0
$R_0$	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	0	0
+10	-0,08	-0,03	-0,02	-0,01	-0,01	-0,01
+20	-0,13	-0,04	-0,03	-0,02	-0,01	-0,01
+30	-0,17	-0,05	-0,04	-0,03	-0,02	-0,01
+40	-0,23	-0,06	-0,05	-0,03	-0,02	-0,02
+50	-0,30	-0,07	-0,05	-0,04	-0,02	-0,02
+60	-0,33	-0,08	-0,06	-0,04	-0,02	-0,02

\* Токи в пяти циклах размагничивания соответственно равны -890, +700, -510, +350, -300 А. Знак "+" означает, что ток в цикле размагничивания имеет одинаковое направление с током в главном цикле.

С целью ускорения работы по корректированию искажений в  $\pi$  от остаточного магнитного поля  $H_0$  было измерено распределение по радиусу поправки  $\Delta n_k$  к показателю неоднородности магнитного поля  $\pi$  при токе 1 А, протекающем по корректирующим проводникам у верхних и нижних полюсов на радиусе  $r = R_0 + 17,5 \text{ см}$  для  $H=160 \text{ Э}$ . Данные этих измерений приведены в табл.4 и на рис.1. Эти данные были использованы при выборе радиусов проводников и величины токов в них для дополнительной коррекции  $\pi$  до уровня 0,65 на  $H=160 \text{ Э}$  при отсутствии системы размагничивания /табл.5/.

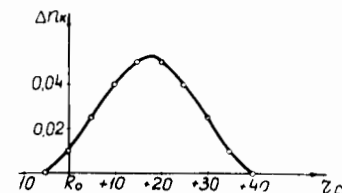


Рис.1. Зависимость поправки  $\Delta n_k = \chi(r)$  от тока  $i=1 \text{ А}$ , протекающего по проводникам обмотки коррекции. Проводники уложены у верхних и нижних полюсов магнита на  $r = R_0 + 17,5 \text{ см}$ .  $V=160 \text{ Гс}$ .

Таблица 2

$\frac{\Delta N_0}{N} \% = \chi(\theta)$  при  $N=160$  Э на квадранте по радиусу  $R_0$   
при работе без системы размагничивания  $i_p = 0$  и при  
одном цикле размагничивания  $i_p = 800$  А/

№ № полюс.	$i_p=0$	$i_p=800$ А	№ № полюс.	$i_p=0$	$i_p=800$ А	№ № полюс.	$i_p=0$	$i_p=800$ А
2	-2,0	-0,2	18	0	0	34	-2,3	+0,1
3	+0,15	-0,2	19	-1,7	-0,2	35	-2,1	0
4	-2,1	-0,35	20	-2,9	-0,3	36	-3,2	+0,2
5	-2,3	+0,1	21	-2,0	-0,2	37	-3,1	0
6	-0,9	+0,35	22	-0,2	+0,1	38	-1,5	+0,2
7	+0,7	-0,15	23	-2,3	+0,2	39	-2,1	-
8	-0,9	-0,25	24	-2,8	0	40	-2,7	-0,15
9	-2,9	-0,25	25	-3,0	-0,1	41	-1,5	0
10	-2,8	-0,15	26	-2,0	+0,1	42	-2,0	-0,15
11	-1,7	-0,3	27	+0,3	-0,15	43	-1,8	+0,2
12	-0,2	-0,4	28	-2,2	-0,2	44	-1,8	+0,25
13	-0,6	-0,2	29	-1,3	-0,25	45	-2,1	+0,4
14	+0,3	-	30	-1,2	+0,05	46	-1,1	+0,5
15	-0,5	+0,1	31	-1,1	-0,15	47	-2,2	+0,3
16	-2,1	-0,2	32	-1,7	-0,2			
17	-0,9	-0,2	33	-3,0	-0,3	усредн.	-1,64	-0,05

Таблица 3

Влияние  $N_0$  на захват и потери пучка протонов при ускорении.  
Число инжектируемых частиц  $-1,7 \cdot 10^{12}$  ч/и

Метод компенсации искажений	Число частиц в бетатрон.реж. ( $\times 10^{10}$ ч/и)	Интенсивн. ( $\times 10^{10}$ ч/и)			Потери до :	
		3	100	3000	100	3000
		мс			мс	
Пять цикл. размагн. и коррекция	67	20	8,5	8,3	2,4	2,4
Один цикл размагн. ( $i_p=800$ А) и коррекция $\tau$	67	20	8,8	8,5	2,3	2,4
Без сист. размагн. и без дополн. коррекции $\tau$		Пучок теряется				
Без сист. размагн., но с дополн. коррекцией $\tau$	70	21	5,6	5,1	3,6	1,1

Таблица 4

$R_0 + \Delta r$ (см)	-5	$R_0$	+5	+10	+15	+20	+25	+30	+35	+40
$\Delta n_k$	0	0,01	0,025	0,04	0,05	0,05	0,04	0,025	0,01	0

В табл. 6 приведено распределение по радиусу поправки  $\Delta n_{k \text{ треб.}}$  необходимой для компенсации искажений  $n$  от остаточного поля до уровня 0,65 на  $N=160$  Э при отсутствии системы размагничивания, и поправки  $\Delta n_{k \text{ получ.}}$ , полученной в результате дополнительного корректирования  $n$  обмотками.

Таблица 5

$\tau$ проводн. относ. $R_0$ см	+67,5	+61	+53,5	+43,5	+17,5	-7,5	-17,5	-33,5	-43,5	-57,5	-61
$i$ А	+2	+2	+1,4	+1,4	+0,5	-1	-1	-1,5	-2	-2	-2
№ № обмот.	1		2		3	4		5		6	

Таблица 6

$\tau$ см	-60	-50	-40	-30	-20	-10	$R_0$	+10	+20	+30	+40	+50	+60
$\Delta n_{k \text{ треб.}}$	-0,28	-0,21	-0,17	-0,10	-0,09	-0,08	-0,04	+0,02	+0,03	+0,05	+0,11	+0,18	+0,21
$\Delta n_{k \text{ получ.}}$	-0,29	-0,25	-0,18	-0,10	-0,09	-0,08	-0,03	+0,03	+0,04	+0,04	+0,10	+0,19	+0,21

На рис. 2 представлено распределение  $n$  по радиусу на  $N=160$  Э при отсутствии системы размагничивания до и после дополнительного корректирования.

Видно, что коррекция большой величины искажений  $n$  проведена достаточно точно, в этом убеждают и данные табл. 3, которые показывают, что величина интенсивности пучка, ускоренного до 20 мс, остается той же, что и при наличии пяти циклов размагничивания. При дальнейшем ускорении для умень-

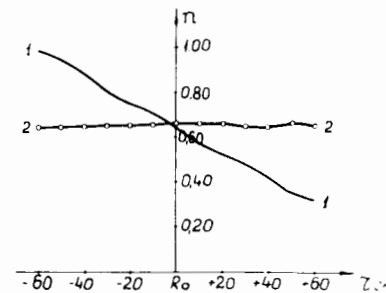


Рис. 2.  $n = \chi(r)$  при отсутствии системы размагничивания.  $V = 160$  Гс, 1 - без дополнительного корректирования, 2 - после корректирования.

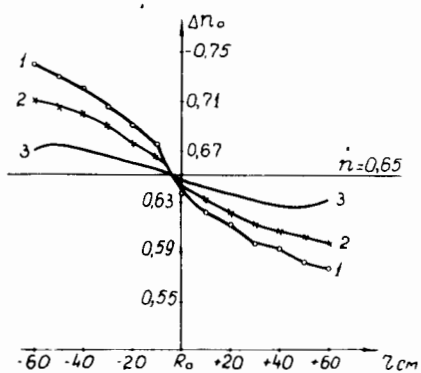


Рис.3.  $\Delta H_0 = \chi(r)$  относительно  $n=0,65$  при одном цикле размагничивания.  $B=160$  Гс. 1 -  $-i_p=340$  А, 2 -  $i_p=500$  А, 3 -  $i_p=800$  А.

шения потерь пучок приходится отводить от  $R_0$  в сторону меньшего радиуса. Но несмотря на это, ко времени 100 мс ускорения потери пучка возрастают в 1,5 раза, а к концу ускорения почти в два раза по сравнению с потерями при работе с пятью

циклами размагничивания. Это указывает на необходимость дальнейшей работы по подбору закона нарастания тока в обмотках коррекции  $n$  с ростом ведущего поля, выяснению наличия и возможности коррекции азимутальной асимметрии в распределении  $n$ , улучшению коррекции орбиты пучка по радиусу.

В связи с ограниченным временем эти работы были отложены на будущее и начато исследование возможности перехода от пяти циклов размагничивания к одному.

#### Б. При наличии одного цикла размагничивания

На восьми полюсах магнита /по два полюса на каждом квадранте/ было измерено распределение поправки  $\Delta H_0$  к показателю неоднородности магнитного поля, обусловленной остаточным полем, относительно  $n=0,65$  для  $H=160$  Э при наличии одного цикла размагничивания с токами 340, 500, 630 и 800 А и с шагом 10 см. При токе в цикле размагничивания 800 А измерения проведены на тридцати полюсах магнита.

Результаты экспериментов приведены в табл. 1 и на рис.3. Из них видно, что минимальные искажения в распределении  $n$  по радиусу вносятся остаточным магнитным полем при одном цикле размагничивания с током 800 А и они сравнимы с  $\Delta H_0$  при наличии пяти циклов размагничивания.

При цикле размагничивания с током 800 А также измерено распределение остаточного магнитного поля по азимуту  $\frac{\Delta H_0}{H}$  % для

$H=160$  Э на радиусах  $R_0$  и  $R_0+60$  см по всем полюсам магнита.

В табл.7 приведены усредненные по квадрантам величины  $\frac{\Delta H_0}{H}$  % и амплитуды первой гармоники искажения орбиты пучка по радиусу от остаточного магнитного поля  $A_r$  для  $H=160$  Э на радиусах  $R_0$  и  $R_0+60$  см при одном цикле размагничивания с током 800 А. На рис.4 для этого случая показано положение первой гармоники искажения орбиты пучка по радиусу.

Таблица 7

	$\Delta H_0 / H \%$				$A_r$ (см)	$\Delta \varphi_0$
	I	II	III	IV		
$R_0 + 60$ см	-0,06	-0,03	+0,03	-0,06	2,4	+108
$R_0$	-0,06	+0,02	+0,04	-0,05	3	+110
$R_0 - 60$ см	-0,02	+0,08	+0,04	-0,01	2,9	+75

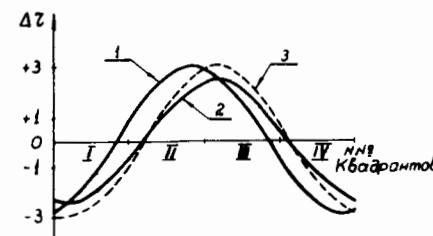


Рис.4. Первая гармоника искажения орбиты пучка в радиальном направлении от остаточного поля при одном цикле размагничивания.  $B=160$  Гс. 1 -  $r = R_0 - 60$  см, 2 -  $r = R_0 + 60$  см, 3 -  $r = R_0$ .

Результаты данной работы показывают, что искажения, вносимые остаточным магнитным полем при наличии одного цикла размагничивания с током 800 А, незначительны и не превышают искажений при наличии пяти циклов размагничивания.

Как видно из табл.3, захват пучка в режим ускорения и его потери в процессе ускорения при наличии одного цикла размагничивания с током 800 А такие же, как и при пяти циклах.

Но благодаря переходу с пяти циклов размагничивания на один существенно сократилась пауза между импульсами ведущего магнитного поля и частота чередования импульсов возрасла более чем в 1,5 раза. Этот режим питания магнита синхрофазотрона стал рабочим.

#### 4. ВЫВОДЫ

Проведенные эксперименты позволили увеличить частоту чередования импульсов более чем в 1,5 раза без ухудшения характеристик магнитного поля и ускоряемого пучка при более устойчивой работе системы питания магнита синхрофазотрона. Они дадут возможность при необходимости работать и без системы размагничивания при предварительном более тщательном корректировании магнитного поля.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Веселов М.Д. и др. Методы и результаты экспериментального исследования магнитного поля синхрофазотрона на 10 млрд. эВ. Тезисы докладов на Всесоюзной конференции по физике частиц высоких энергий. 14-22 мая 1956 г. Изд-во АН СССР, М., 1956.
2. Комар Е.Г. Ускорители заряженных частиц. Атомиздат, М., 1964.
3. Котов В.И. и др. Физические основы современных резонансных ускорителей. УФН, 1958, т. XIV, вып.2.
4. Коломенский А.А., Лебедев А.Н. Теория циклических ускорителей. ГИФМЛ, М., 1962.

Рукопись поступила в издательский отдел  
13 июля 1982 года.

Заболотин В.П. и др. Остаточное магнитное поле в электромагните синхрофазотрона ОИЯИ и его компенсация 9-82-515

В работе приводятся данные об искажении показателя неоднородности магнитного поля  $n$  и орбиты пучка в радиальном направлении, вносимом остаточным магнитным полем  $H_0$  при работе без системы размагничивания, а также при наличии как пяти, так и одного циклов размагничивания. Описаны результаты корректирования распределения по радиусу показателя магнитного поля до уровня  $n=0,65$  в начальный период ускорения без системы размагничивания. Показано, что искажение магнитного поля при одном цикле размагничивания с током 800 А так же мало, как и при пяти циклах. Однако переход с пяти циклов размагничивания на один позволил сократить паузу между циклами ведущего магнитного поля, благодаря чему более чем в полтора раза увеличилась частота их чередования.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1982

Zabolotin V.P. et al. Residual Magnetic Field in the magnet of the Dubna Synchrophasotron and its Compensation 9-82-515

Data are presented on the distortion of the index  $n$  of the magnetic field inhomogeneity and the beam orbit in the radial direction by the residual magnetic field  $H_0$  when operating without a demagnetization system and with five cycles and one cycle of demagnetization. Results are described of correcting the distribution for the radius of the magnetic field index to  $n=0.65$  at the initial stage of acceleration without the demagnetization system. It is shown that the distortion of the magnetic field in one cycle of demagnetization at a current of 800 A is small as five cycle demagnetization. However, the transition from five cycle of demagnetization to one made it possible to decrease an interval between cycles of the leading magnetic field. Due to this, the frequency of alternation of cycle has been increased by a factor of  $>1.5$ .

The investigation has been performed at the Laboratory of High Energies, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1982

Перевод О.С.Виноградовой.