

12374

3143/2-79



сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
Дубна

СЗУСеУ

21С - 696

13/8-79

P11 - 12374

Е.П. Жидков, И.Б. Иссинский, Т.П. Кочкина,

Е.М. Кулакова, Л.А. Смирнова, Б.В. Феоктистов

РАСЧЕТ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

ДЛЯ КОРРЕКЦИИ ОРБИТ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

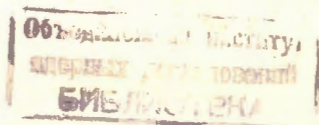
В СИНХРОФАЗОТРОНЕ ОИЯИ

1979

P11 - 12374

Е.П.Жидков, И.Б.Иссинский, Т.П.Кочкина,
Е.М.Кулакова, Л.А.Смирнова, Б.В.Феоктистов

РАСЧЕТ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ
ДЛЯ КОРРЕКЦИИ ОРБИТ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ
В СИНХРОФАЗОТРОНЕ ОИЯИ



Жидков Е.П. и др.

PII - 12374

Расчет магнитных полей для коррекции орбит заряженных частиц в синхрофазотроне ОИЯИ

В данной работе поставлена задача расчета корректирующих токов в проводниках, расположенных в прямолинейных промежутках, с целью коррекции вертикальных орбит циркулирующего пучка. Создан алгоритм решения поставленной задачи с применением непрерывного аналога метода Ньютона. Полученные результаты показывают возможность коррекции вертикальных орбит при взятой конфигурации магнитного поля ускорителя до величины менее 1 см, что можно считать вполне приемлемым с точки зрения допусков на отклонение орбиты.

Работа выполнена в Лаборатории вычислительной техники и автоматизации ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований, Дубна 1979

Zhidkov E.P. et al.

PII - 12374

Calculation of Magnetic Fields to Correct Charged Particle Trajectories in JINR Synchrophasotron

The problem of calculating correcting currents in the conductors positioned in the straightsections to correct vertical beam dynamics is presented. The algorithm of computer analogue of the Newton method is presented. The obtained results demonstrate the possibility of correcting vertical trajectories at a taken configuration of the synchrophasotron magnetic field up to value less than 1 cm which could be quite acceptable from the point of view of allowance for trajectory deflection.

The investigation has been performed at the Laboratory of Computing Techniques and Automation, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1979

Проблема повышения интенсивности пучков синхрофазотрона ОИЯИ остается актуальной, и в связи с этим ведутся как расчетные, так и экспериментальные работы.

Работы, проводившиеся в последнее время^{/1/}, показали, что потери пучка на начальной стадии ускорения все еще очень велики и не могут считаться допустимыми.

Впервые причины потерь пучка при ускорении в синхрофазотроне были объяснены в работе^{/2/}, где было показано, что существующие искажения магнитного поля приводят к деформации орбит, резонансам бетатронных колебаний и, в конечном итоге, потерям в ускоряемом пучке.

В данной работе поставлена задача расчета корректирующих токов в проводниках, расположенных в прямолинейных промежутках, с целью коррекции орбит циркулирующего пучка. Эти расчеты выполнены с применением непрерывного аналога метода Ньютона^{/3/}.

1. Предварительные замечания

1.1. В каждом квадранте синхрофазотрона мы берем цилиндрическую систему координат (φ, R, z) с началом в точке O_i ($i=1, 2, 3, 4$), где i - номер квадранта (см.рис.1).

В каждом промежутке между квадрантами ускорителя мы берем декартову систему координат (x, y, z_D) с началом в точке $O_{i,D}$ ($i=1, 2, 3, 4$), где i - номер промежутка.

Оси z цилиндрических систем координат и оси z_D декартовых систем координат направлены во всех случаях вверх от плоскости чертежа.

Если заранее неизвестно, где расположена точка M (в квадранте или в промежутке между квадрантами), то это обстоятельство будем записывать так: $M(\xi, \eta, \zeta)$, заменяя в дальнейшем (ξ, η, ζ) на (φ, R, z) или (x, y, z_D) соответственно.

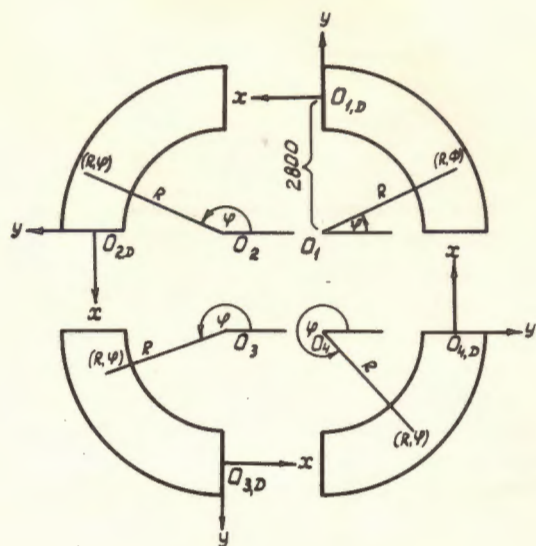


Рис. I

1.2. В промежутках между квадрантами размещаются пары проводников, параллельных оси Ox . Каждая пара проводников находится в плоскости $y = const$, и проводники этой пары симметричны относительно плоскости $z_D = 0$. Если в одном проводнике пары сила тока равна J , то в другом проводнике сила тока равна $(-J)$. Токи в проводниках одной пары не зависят от токов в проводниках любой другой пары. Положение пары проводников задается координатами (x, y, z_D) , где $z_D \geq 0$ конца проводника, ближайшего к началу координат $O_{i,D}$, и длиной l этого проводника (см. рис. 2.). Для этого же проводника указывается сила тока. В каждом промежутке расположено по четыре пары проводников.

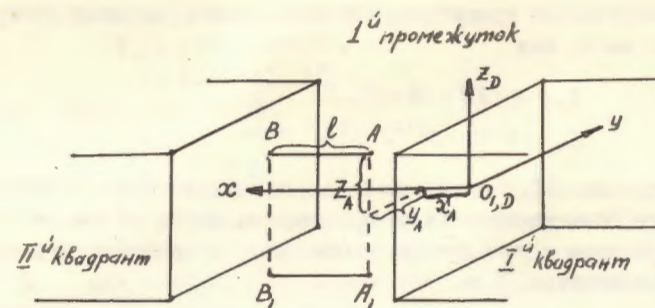


Рис. 2

1.3. В расчетах, приводимых в настоящей работе, для случая движения частицы в квадрантах ускорителя использовалась модель магнитного поля, описанная в [3].

2. Постановка задачи и алгоритм ее решения

Пусть

$$\left. \begin{aligned} \eta''_z &= \Phi_1(\xi, \eta, \zeta, \eta'_z, \zeta'_z), \\ \zeta''_z &= \Phi_2(\xi, \eta, \zeta, \eta'_z, \zeta'_z) \end{aligned} \right\} - \quad (I)$$

дифференциальные уравнения движения заряженной частицы в магнитном поле синхрофазотрона (одночастичная модель).

Пусть

$$\eta = \eta(\xi), \quad (2)$$

$$\zeta = \zeta(\xi) \quad (3)$$

периодическое решение (периодическая траектория, орбита) системы (I) в промежутке $a \leq \xi \leq b$, т.е. такое решение системы (I), которое удовлетворяет крайним условиям:

$$\left. \begin{aligned} \eta(a) &= \eta(b), \\ \zeta(a) &= \zeta(b), \\ \eta'(a) &= \eta'(b), \\ \zeta'(a) &= \zeta'(b) \end{aligned} \right\} , \quad (4)$$

где a и b таковы, что решение (2), (3) соответствует одному полному обороту частицы в ускорителе.

Периодическая траектория (2), (3) согласно проекту ускорителя должна иметь вид

$$\eta_n = \eta(\xi) = const, \quad (5)$$

$$\zeta_n = \zeta(\xi) = 0^* \quad (6)$$

Однако условия (5), (6) или одно из них, вследствие отклонений магнитного поля ускорителя от проектного, могут не выполняться.

Рассмотрим случай, когда условие (5) выполняется, а условие (6) не выполняется. Т.е.

$$\eta_\phi = \eta(\xi) = const, \quad (7)$$

$$\zeta_\phi = \zeta(\xi) \neq 0. \quad (8)$$

Чтобы выполнилось условие (6), нужно произвести коррекцию магнитного поля ускорителя.

Один из возможных вариантов такой коррекции с помощью магнитного поля, создаваемого токами в проводниках, расположенных в промежутках между квадрантами (см. раздел I.2), которая приводит к коррекции периодических траекторий, технически реализован на синхротроне^{4/}. Трудность заключается в подборе корректирующих токов в проводниках. До настоящего времени токи подбирались методом проб. В^{5/} предложен численный метод подбора корректирующих токов.

Пусть токи в проводниках, расположенных в промежутках, будут

$$J_1, J_2, \dots, J_{16}. \quad (9)$$

Полагаем, что в (7) $\eta_\phi = const$ не зависит от параметров (9), а ζ_ϕ в (8) является их функцией

$$\zeta_\phi = \zeta(\xi, J_1, J_2, \dots, J_{16}). \quad (10)$$

Пусть функционал

$$\sigma = \sum_{i=1}^n [\zeta_{n,i}(\xi_i) - \zeta_{\phi,i}(\xi_i; J_1, J_2, \dots, J_{16})]^2 \quad (11)$$

достигает минимума при следующих значениях параметров (9):

$$J_1^*, J_2^*, \dots, J_{16}^*.$$

* Практически достаточно, чтобы в (6) $\zeta(\xi)$ было мало.

Например: $|\zeta(\xi)| \leq 1$ (см).

Тогда фактическая периодическая траектория

$$\left. \begin{aligned} \eta_\phi &= \eta(\xi) = const, \\ \zeta_\phi &= \zeta(\xi; J_1^*, J_2^*, \dots, J_{16}^*) \end{aligned} \right\}$$

будет близка к проектной

$$\left. \begin{aligned} \eta_\phi &= \eta_n = const, \\ \zeta_\phi &\approx \zeta_n = 0 \end{aligned} \right\} -$$

и задача коррекции периодической траектории решена.

Будем говорить, что периодическая траектория (7), (8) оптимизирована, если найдена такая совокупность параметров J_j ($j=1, 2, \dots, 16$), для которой (7) сохраняется, а ζ в уравнении (8) удовлетворяет условию

$$|\zeta(\xi, J_j)| \leq 1 \quad \text{для любого } \xi \in [a, b].$$

3. Результаты вычислений

Результаты вычислений представлены в таблицах 1, 2, 3, 4 для двух реально возможных расположений проводников в промежутках.

В таблице 4 (колонка 2) приведены $|\zeta(\xi)|_{\max}$ — наибольшие отклонения от плоскости $\zeta=0$ фактических периодических траекторий (т.е. траекторий, не подвергавшихся коррекции), для которых R равно 2740, ..., 2850 (см. колонку 1).

Если в промежутках разместить пары проводников, как это указано в таблице 1 (колонки I-6), то, используя алгоритм, изложенный в разделе 2, можно оптимизировать указанные выше траектории. Полученная при этом совокупность токов (ради краткости она обозначена буквой H) указана в строках колонки 7 таблицы 1, а наибольшие отклонения от плоскости $\zeta=0$ соответствующих периодических траекторий приведены в колонке 3 таблицы 4. На рис. 3 изображены графики $\zeta = \zeta(\xi)$ периодических траекторий, соответствующих $R=2800$ до оптимизации (I) и после (II).

В таблице 2 приведено иное, в сравнении с предыдущим, расположение проводников в промежутках. Для этой системы проводников вычислено несколько совокупностей корректирующих токов (L, Q, M, P, N) (см. табл. 3), каждая из которых оптимизирует периодические траектории, для которых R находится в промежутке (2740; 2850) — см. табл. 4.

Полученные результаты показывают возможность коррекции вертикальных орбит при взятой конфигурации магнитного поля до величины менее 1 см , что можно считать вполне приемлемым с точки зрения допусков на отклонение орбиты. В дальнейшем данную методи-

ку, очевидно, целесообразно применять для оперативной коррекции орбит на ускорителе по мере уточнения измерений магнитного поля.



Рис.3

Таблица I

№№ пром-жутка	№№ проводника (j)	координаты начала проводника			Длина проводника (см)	Сила тока коррекции I_j в проводнике (А)
		x (см)	y (см)	z _p (см)		
1	2	3	4	5	6	7
1	1	0	75	20	800	0,82398
2	5	0	75	20	800	4,5441
3	9	0	75	20	800	11,339
4	13	0	75	20	800	-29,415
1	2	0	25	20	800	-2,7097
2	6	0	25	20	800	-1,9010
3	10	0	25	20	800	1,6269
4	14	0	25	20	800	-12,402
1	3	0	-25	20	800	-5,1791
2	7	0	-25	20	800	-4,0324
3	11	0	-25	20	800	1,5723
4	15	0	-25	20	800	-20,0
1	4	0	-75	20	800	-13,896
2	8	0	-75	20	800	-12,841
3	12	0	-75	20	800	-2,3308
4	16	0	-75	20	800	-35,694

Таблица 2

№№ пром-жутка	№№ проводника (j)	Координаты начала проводника			Длина проводника l (см)
		x (см)	y (см)	z _p (см)	
1	2	3	4	5	6
1	1	185	75	83	430
2	5	0	75	66	800
3	9	115	75	86	570
4	13	0	75	55	800
1	2	185	25	83	430
2	6	0	25	61	800
3	10	115	25	86	570
4	14	0	25	55	800
1	3	185	-25	83	430
2	7	0	-25	61	800
3	11	115	-25	86	570
4	15	0	-25	55	800
1	4	185	-75	83	430
2	8	0	-75	61	800
3	12	115	-75	86	570
4	16	0	-75	55	800

Таблица 3

№№ пром-жутка	№№ проводника (j)	Токи коррекции I_j в проводниках, положение которых задано таблицей 2				
		L	Q	M	P	N
1	2	3	4	5	6	7
1	1	17,221	0	35,882	0	0
2	5	11,214	0	19,919	0	0
3	9	28,145	14,703	42,213	14,563	24,569
4	13	-23,146	-32,836	-11,671	-29,023	-46,408
1	2	-2,9371	-2,9371	-26,039	-26,039	-0,21820
2	6	-1,1290	-1,1290	-10,155	-10,155	0,43703
3	10	6,7506	6,7506	-4,7395	-4,7395	-0,094347
4	14	-18,152	-18,152	-33,878	-33,878	-3,3008
1	3	-2,6548	-2,6548	-13,328	-13,328	0,51685
2	7	-3,7994	-3,7994	-6,0114	-6,0114	-1,2822
3	11	11,908	11,908	-1,6184	-1,6184	7,5063
4	15	-28,771	-28,771	-18,763	-18,763	-18,661
1	4	-68,557	-68,557	-33,339	-33,339	-65,168
2	8	-26,776	-26,776	-15,556	-15,556	-24,524
3	12	-26,242	-26,242	-9,2444	-9,2444	-13,780
4	16	-38,556	-38,556	-33,848	-33,848	-52,260

Таблица 4

R (см)	$ \mathcal{I}(\xi; J_j) _{\text{наиб}}$ когда все $J_j = 0$	$ \mathcal{I}(\xi; J_j) _{\text{наиб}}$ (см)					
		H	L	Q	M	P	N
1	2	3	4	5	6	7	8
2740	2,7	0,88	0,35	0,42	0,63	0,49	0,45
2750	2,6	0,45	0,41	0,48	0,52	0,38	0,45
2760	2,6	0,49	0,44	0,51	0,45	0,41	0,40
2770	2,7	0,85	0,45	0,54	0,39	0,47	0,34
2780	2,8	0,83	0,46	0,54	0,34	0,52	0,30
2790	3,0	0,36	0,44	0,53	0,38	0,57	0,40
2800	3,2	0,69	0,40	0,51	0,42	0,63	0,50
2810	3,5	0,63	0,39	0,50	0,47	0,70	0,58
2820	3,8	0,37	0,37	0,50	0,51	0,77	0,59
2830	4,9	0,44	0,37	0,51	0,53	0,80	0,60
2840	7,0	0,44	0,34	0,50	0,47	0,77	0,60
2850	10,6	0,65	0,29	0,48	0,28	0,64	0,42

Литература

1. Ю.Д.Безногих и др. ОИЯИ, Р9-11903, Дубна, 1978.
2. В.В.Василишин и др. ОИЯИ, Б1-9-8031, Дубна, 1974.
3. Е.П.Жидков и др. ОИЯИ, И1-9966, Дубна, 1976.
4. Ю.Д.Безногих и др. ОИЯИ, Б2-9-7208, Дубна, 1972.
5. Е.П.Жидков и др. Оптимизация периодических траекторий заряженных частиц путем коррекции магнитного поля синхрофазотрона в прямолинейных промежутках. Сопровождение по программированию и математическим методам решения физических задач. Дубна, 20-23 сентября 1977 г. ОИЯИ Д10, И1-11264, Дубна, 1978.

Рукопись поступила в издательский отдел
10 апреля 1979 года.