



СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

1576 / 2-80

7/4-80

9 - 13008

Д.Х.Динев

О КОРРЕКЦИЯХ В ТЯЖЕЛОИОННОМ СИНХРОТРОНЕ
С ТРИПЛЕТНОЙ МАГНИТНОЙ СТРУКТУРОЙ

1980

1. ВВЕДЕНИЕ

Для исследований в области релятивистской ядерной физики, изучения аномальных состояний атомных ядер и др. в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ проектируется ускорительный комплекс тяжелых ионов /УКТИ/^{1/}, в котором предполагается ускорять ионы всех ядер вплоть до урана. Структура УКТИ двухступенчатая. Первая ступень представляет собой тяжелоионный синхротрон /ТИС/ на энергию 250 МэВ/нуклон /по урану/, вторая ступень - существующий в ЛВЭ синхрофазотрон, в котором ионы будут доускоряться до энергии 3,4 ГэВ/нуклон.

В работах^{2,3/} были рассмотрены некоторые вопросы коррекции поперечного движения ионов в тяжелоионном синхротроне. В настоящее время разрабатывается вариант ТИС с триплетной магнитной структурой /рис. 1/.

Основные параметры триплетного варианта ТИС:

параметр Π	- 154,56 м
магнитная жесткость $B_{0\rho}$	
при инжекции	- 1,556 Тм
максимальная	- 9,874 Тм
радиус кривизны орбиты в диполях ρ	- 7,497 м
магнитное поле B_0	
при инжекции	- 0,2 Т
максимальное	- 1,3 Т
градиент в Φ линзах g_{Φ}	
при инжекции	- 1,6 Т/м
максимальный	- 10,16 Т/м
градиент в D линзах g_D	
при инжекции	- 1,6 Т/м
максимальный	- 10,46 Т/м
количество периодов P	- 16
количество диполей M	- 32
количество квадрупольей K	- 48
эффективная длина диполей Δs_M	- 1,48 м
эффективная длина Φ квадрупольей $\Delta s_{g_{\Phi}}$	- 0,36 м
эффективная длина D квадрупольей Δs_{g_D}	- 0,60 м.



частота бетатронных колебаний

$$Q_x = -4,8$$

$$Q_z = -3,85$$

В настоящей работе рассмотрены вопросы коррекции поперечного движения ионов в варианте ТИС с триплетной магнитной структурой.

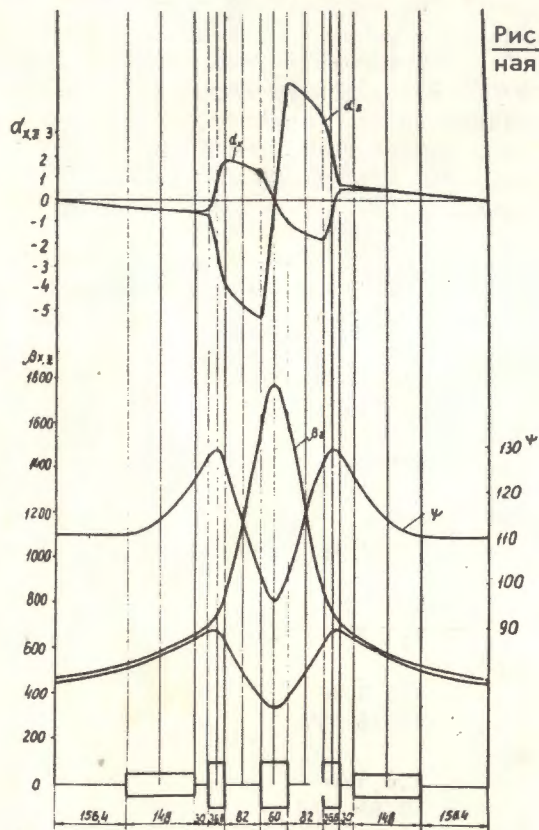


Рис. 1. Триплетная магнитная структура ТИС.

2. КОРРЕКЦИЯ ЗАМКНУТОЙ ОРБИТЫ

Один из основных вопросов оптимальной работы ускорителя - контроль и корректирование положения замкнутой орбиты.

Как известно, в нормированных переменных

$$\eta = \frac{x}{\sqrt{\beta}}, \quad /1/$$

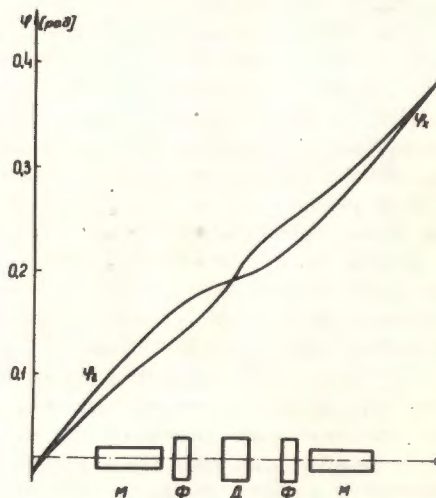
$$\phi = \int_0^s \frac{ds}{Q\beta} \quad /2/$$

уравнение движения в поперечной плоскости принимает следующий "сглаженный" вид:

$$\frac{d^2 \eta}{d\phi^2} + Q^2 \eta = Q^2 f(\phi), \quad /3/$$

где $f(\phi)$ - функция, описывающая возмущения. Замкнутая орбита является периодическим /с периодом 2π / частным решением этого уравнения. Для триплетного варианта ТИС обобщенный азимут ϕ показан на рис. 2.

Рис. 2. Обобщенный азимут триплетной структуры.



Пусть на периметре ускорителя расположены M диполей, K квадруполей, $2N$ корректирующих диполей и $2N$ сигнальных электродов.

Пусть P - это количество периодов, M_p , K_p , N_p - количество соответствующих элементов за период. Для дисперсии замкнутой орбиты $\eta(\phi) - \sigma_\eta^2$ можно получить следующую формулу:

$$\sigma_{\eta i}^2 = \left[\frac{\Delta s_M}{2B_0 \rho \sin \pi Q} \right]^2 \sigma_B^2 \sum_{j=1}^{M_p} \frac{\beta_j}{2} \left[\frac{\cos(\alpha_{ij} - 2\pi Q \frac{P-1}{P}) \sin 2\pi Q}{\sin 2\pi Q/P} + p \right] + /4/$$

$$+ \left[\frac{g \Delta s_g}{2B_0 \rho \sin \pi Q} \right]^2 \sigma_g^2 \sum_{j=1}^{K_p} \frac{\beta_j}{2} \left[\frac{\cos(\alpha_{ij} - 2\pi Q \frac{P-1}{P}) \sin 2\pi Q}{\sin 2\pi Q/P} + p \right],$$

где $a_{ij} = 2Q(\phi_i + \pi - \phi_j)$.

/5/

В /4/ с σ_B^2 мы обозначили дисперсию возмущений магнитного поля ΔB , а с σ_g^2 - дисперсию возмущений положения квадрупольных полей ΔX .

Возмущения магнитного поля, вызывающие отклонения замкнутой орбиты, можно объединить в следующие три группы:

а/ постоянные возмущения, вызываемые паразитными магнитными полями, токами Фуко и др. Эти возмущения существенны только в начале цикла ускорения;

б/ возмущения, пропорциональные величине основного поля, вызываемые ошибками юстировки, ошибками в μ , паразитными полями и др.;

в/ возмущения, появляющиеся при высоких полях, вызываемые ошибками насыщения.

Для ТИС мы принимаем, что возмущения группы а/ равны $\sigma_B = 1$ Гс; группы б/ - $\sigma_B = 5 \times 10^{-4} B_0$. Ошибками насыщения при этом можно пренебречь. Ошибки в юстировке принимаем $\sigma_{\Delta x} = 0,30$ мм для горизонтальной плоскости, $\sigma_{\Delta z} = 0,20$ мм - для вертикальной. Ошибки в наклоне магнитов принимаем $\sigma_a = 0,3$ мрад. При этих допущениях из /4/ получаем: $\sigma_x = 5,2$ мм; $\sigma_z = 3,8$ мм.

Возмущения ΔB и Δx и смещение орбиты η - это случайные функции обобщенного азимута.

В результате измерения орбиты $\eta(\phi)$ при помощи сигнальных электродов нам известна не вся функция $\eta(\phi)$, а только ее значения в $2N$ точках. На основе такой неполной информации об орбите мы не можем судить о возмущениях, так как, обычно, $M+K > 2N$. Это связано с тем, что по $2N$ точкам нельзя узнать все фурье-гармоники орбиты. Можно вычислить не более чем приближенные значения первых N гармоник.

На основе сделанного в работе /2/ анализа предлагается замкнутую орбиту считать оптимальной, если функционал Δ^2 имеет минимум:

$$2\Delta^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{2N} \eta_i^2 + \sum_{p,q=1}^{2N} A_{pq} \eta_p \delta_{BC} + \sum_{p,q=1}^{2N} B_{pq} \delta_{BC} \delta_{BC}, \quad /6/$$

где

$$A_{pq} = \frac{2}{N} \sum_{k=1}^{N-1} c_k \cos k(\phi_p - \phi_q) + \frac{\sqrt{2}}{N} c_N \cos N\phi_p \cos N\phi_q, \quad /7/$$

$$B_{pq} = \sum_{k=1}^{\infty} c_k^2 \cos k(\phi_p - \phi_q), \quad /8/$$

$$c_k = \frac{2Q \sin \pi Q}{\pi(Q^2 - k^2)}.$$

/9/

В /6/ δ^{BC} означает обобщенную силу корректирующих диполей:

$$\delta = \begin{cases} \frac{1}{2Q \sin \pi Q} \frac{\sqrt{\beta} \Delta B \Delta s}{B_0 \rho} & - \text{ для диполей} \\ \frac{1}{2 \sin \pi Q} \frac{\sqrt{\beta} g \Delta x \Delta s}{B_0 \rho} & - \text{ для квадрупольных.} \end{cases} \quad /10/$$

ϕ_p - азимуты сигнальных электродов во второй сумме и азимуты корректоров в третьей сумме; ϕ_q - азимуты корректоров во второй и третьей сумме. Имеем $4N^2$ коэффициентов A_{pq} и $4N^2$ коэффициентов B_{pq} . Оптимизацию можно проводить при помощи ЭВМ по блок-схеме, показанной на рис. 3.



Рис. 3. Блок-схема коррекции замкнутой орбиты.

При этом предполагается, что возмущения $\Delta B(\phi)$ и $\Delta x(\phi)$ будут довольно медленно меняться во времени. Качество коррекции является отношением среднеквадратичного отклонения скорректированной орбиты к такому же отклонению нескорректированной орбиты

$$K = \frac{\sigma_{\text{корр.}}}{\sigma_{\text{некорр.}}} \quad /11/$$

Из работы /2/ видно, что

$$K^2 = \frac{A^2}{B^2}, \quad /12/$$

$$\text{где } A^2 = \sum_{k=N}^{\infty} \frac{1}{(Q^2 - k^2)^2} + \sum_{j=1}^{\infty} \frac{1}{(Q^2 - (2Nj)^2)^2} +$$

$$+ \sum_{k=1}^{N-1} \sum_{j=1}^{\infty} \left(\frac{1}{(Q^2 - (2Nj - k)^2)^2} + \frac{1}{(Q^2 - (2Nj + k)^2)^2} \right) + \frac{1}{2} \frac{1}{(Q^2 - N^2)^2} \quad /13/$$

$$+ \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{\infty} \left(\frac{1}{(Q^2 - (2Nj - N)^2)^2} + \frac{1}{(Q^2 - (2Nj + N)^2)^2} \right),$$

$$B^2 = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{(Q^2 - k^2)^2} \quad /14/$$

Для триплетной структуры ТИС зависимость качества коррекции K от числа корректоров $2N$ показана на рис. 4.

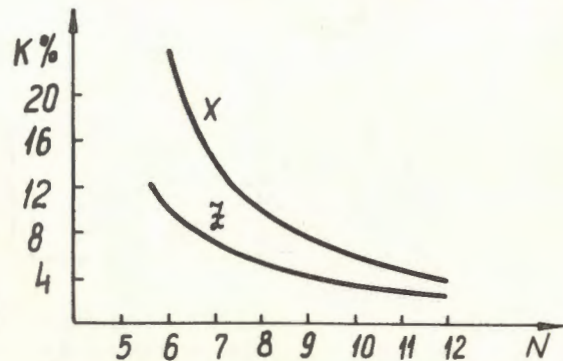


Рис. 4. Качество коррекции замкнутой орбиты.

Можно выбрать $2N=16$, что отвечает $K = 5\% \div 10\%$.

Предлагаемое расположение корректирующих диполей и сигнальных электродов представлено в табл. 1.

Для оценки максимальной силы корректоров будем исходить из

$$\eta_i = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, 2N).$$

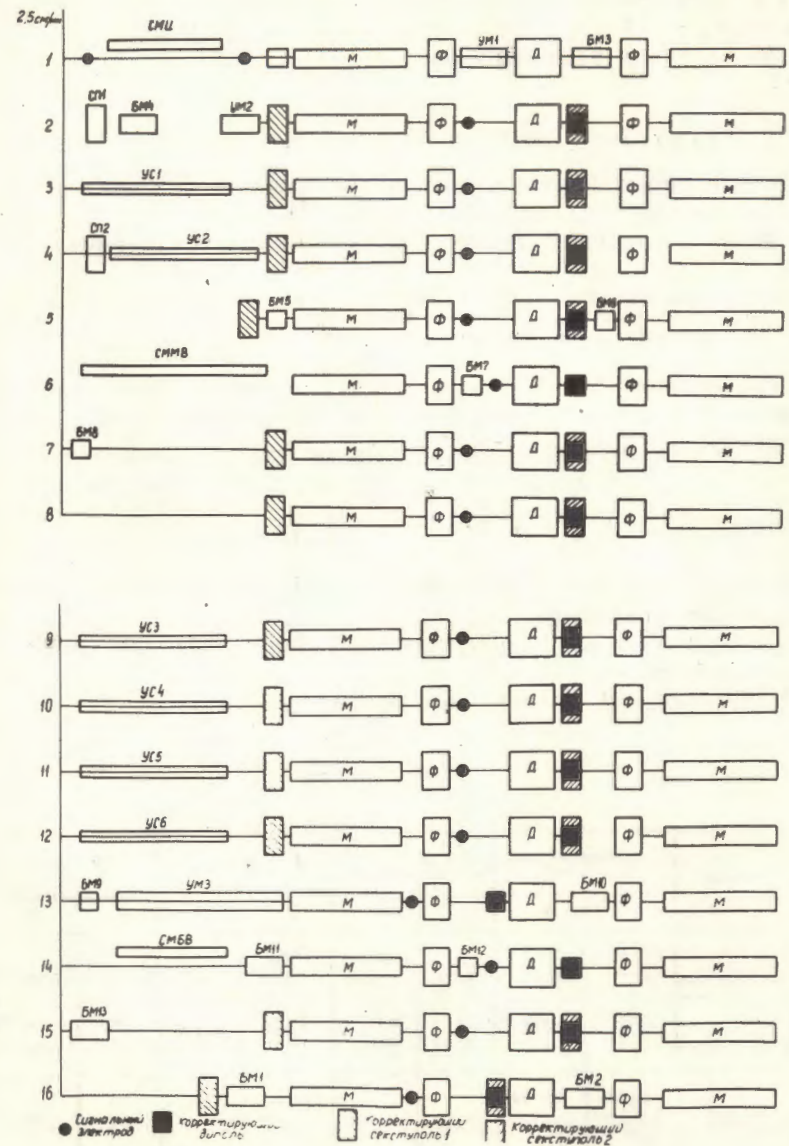
Из этого условия следует ^{1/2/}, что

$$\sigma_{\eta i}^2 = \sum_{k=1}^{Np} A_k \sigma_{Bc, k}^2 \quad /15/$$

$$\text{где } A_k = \frac{p}{2} + \frac{1}{2} [\cos 2Q(\phi_i + \pi - \phi_k) - 2\pi Q \frac{p-1}{p}] \frac{\sin 2\pi Q}{\sin 2\pi Q/p} \quad /16/$$

Таблица 1

Схема расположения корректирующих элементов



Из /15/ следует $\sigma_{V_c} = 110$ Гс для горизонтальной плоскости и $\sigma_{V_c} = 68$ Гс - для вертикальной.

Здесь мы будем пользоваться интервалом 2σ /вероятность 0,95/. Следовательно, рекомендуемая сила корректирующих диполей $V_c = 220$ Гс - для горизонтальной плоскости, $V_c = 136$ Гс - для вертикальной.

3. ГРАДИЕНТНОЕ СМЕЩЕНИЕ БЕТАТРОННЫХ ЧАСТОТ

При наличии ошибок в градиентах появляется связанное с ними смещение бетатронных частот /3/.

Влияние систематических ошибок описывается формулой

$$\Delta Q_{x,z} = \mp \frac{1}{4\pi} \int \beta_{x,z} \frac{\Delta(\partial B_z / \partial x)}{B_0 \rho} ds. \quad /17/$$

При наличии случайных ошибок в градиентах для средне-квадратичного отклонения смещения бетатронных частот можно получить

$$\sigma_{\Delta Q_{x,z}} = \frac{1}{4\pi} \sqrt{\sum_p \left(\frac{\beta_{x,zp} (\partial B_z / \partial x)_p l_p}{B_0 \rho} \right)^2} \sigma_{\Delta g/g}, \quad /18/$$

где $\sigma_{\Delta g/g}$ означает среднеквадратичное отклонение относительной ошибки градиента.

Предварительные оценки ошибок в градиентах для тяжелоионного синхротрона ТИС и вычисление на их основе при помощи /17,18/ смещения бетатронных частот даны в табл. 2.

Таблица 2

Элемент	Систематические ошибки		Δ систематическое		Случайные ошибки		σ_{Δ}	
	X	Z	X	Z	X	Z	X	Z
φ квадруполь	$\frac{+g/g}{=10^{-3}}$	$\frac{+g/g}{=10^{-3}}$	-0,006	+0,007	$\frac{\sigma_{+g/g}}{=10^{-3}}$	$\frac{\sigma_{+g/g}}{=10^{-3}}$	0,0011	0,0012
Π квадруполь	$\frac{+g/g}{=10^{-3}}$	$\frac{+g/g}{=10^{-3}}$	-0,003	+0,014	$\frac{\sigma_{+g/g}}{=10^{-3}}$	$\frac{\sigma_{+g/g}}{=10^{-3}}$	0,0006	0,0008
Диполь	$\frac{+g/g_0}{4,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1}}$	$\frac{+g/g_0}{4,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1}}$	-0,013	+0,013	$\frac{\sigma_{+g/g_0}}{2,3 \cdot 10^{-3}}$	$\frac{\sigma_{+g/g_0}}{2,3 \cdot 10^{-3}}$	0,0011	0,0012

4. ХРОМАТИЧНОСТЬ И СЕКСТУПОЛЬНЫЕ КОРРЕКЦИИ

Бетатронные частоты неравновесных частиц отличаются от бетатронной частоты равновесной частицы. Для смещения бетатронной частоты с импульсом /т.н. хроматичность/ можно получить /3/:

$$\frac{\Delta Q_x}{\Delta p/p} = - \frac{1}{4\pi \rho^2} \int_M \beta_x ds + \frac{1}{4\pi M \rho} \int \psi \gamma_x ds - \frac{1}{2\pi M \rho} \int \psi' \alpha_x ds - \frac{1}{4\pi B_0 \rho} \int_K \beta_x \frac{\partial B_z}{\partial x} ds, \quad /19/$$

$$\frac{\Delta Q_z}{\Delta p/p} = \frac{1}{4\pi M \rho} \int \psi \gamma_z ds + \frac{1}{4\pi B_0 \rho} \int_K \beta_z \frac{\partial B_z}{\partial x} ds. \quad /20/$$

Из /19/, /20/ можно получить $\frac{\Delta Q_x}{\Delta p/p} = -3,74$; $\frac{\Delta Q_z}{\Delta p/p} = -7,25$.

Предполагается ускорить в ТИС одновременно ионы трех зарядностей - +69, +70, +71. Этому отвечает $\Delta p/p = +1,4\%$. Отсюда следует, что ожидаемое смещение частот для разных зарядностей будет $\Delta Q_x = \mp 0,05$; $\Delta Q_z = \mp 0,010$.

Для компенсации хроматичности вводятся компенсирующие секступольные линзы, вызываемая ими хроматичность дается выражением

$$\frac{\Delta Q_{x,z}}{\Delta p/p} = \pm \frac{1}{4\pi B_0 \rho} \int \psi \left(\frac{\partial^2 B_z}{\partial x^2} \right) \beta_{x,z} ds. \quad /21/$$

Для компенсации хроматичности можно использовать две системы секступольных линз, как это показано в табл. 1. Из /21/ можно получить

$$\left(\frac{\partial^2 B_z}{\partial x^2} \right)_1 = +71,2 \text{ Т/м}^2,$$

$$\left(\frac{\partial^2 B_z}{\partial x^2} \right)_2 = -45,9 \text{ Т/м}^2.$$

В некоторых местах можно использовать комбинированные корректоры, как это показано в табл. 1.

ЛИТЕРАТУРА

1. Балдин А.М. и др. ОИЯИ, 9-11796, Дубна, 1978.
2. Динев Д. ОИЯИ, 9-12479, Дубна, 1979.
3. Динев Д. ОИЯИ, 9-12626, Дубна, 1979.

Рукопись поступила в издательский отдел 18 декабря 1979 года.