Институт Теоретической и
Экспериментальной Физики

2 – 04

ITEP-2-04

Д.Г.Кошкарёв, А.В.Бархударян, А.Е.Большаков.

FERMILAB
JUL 20 2004
LIBRARY

Оптимизация магнитной структуры У-10

Москва 2004

УДК 621.384 М-16

Оптимизация магнитной структуры У-10: Препринт ИТЭФ - 02 - 04/

Кошкарёв Д.Г., Бархударян А.В., Большаков А.Е. М. 2004. 6 с.

В проекте накопителя тяжелых ионов (проект ТВН-ИТЭФ) накопление ионов производится в камере протонного синхротрона У-10 ИТЭФ. Энергия накопленного пучка определяется числом накопленных ионов, которое, в свою очередь, зависит от размера доступного для движения ионов фазового пространства - эмиттанса. В данной работе сделана попытка увеличить эмиттанс пучка подавлением резонансов на частотах 9,33 и 9,25, возникающих в рабочей клетке частот из-за разброса нелинейных компонент в магнитных полях Е-блоков У-10. Подавление резонансных гармоник, 28-ой для квадратичной нелинейности, 37-ой для кубической нелинейности и 65-ой для нелинейностей шестой степени, осуществляется перестановкой пяти Е блоков а три Е блока сохраняют своё место на кольце У-10. В новом размещении эти гармоники будут значительно ослаблены - 28-я гармоника ослабляется в 25 раз, 37-я и 65 в 5раз.

Optimization of the magnet structure U-10.

D.G.Koshkarev, A.V. Barkhudaryan, A.E.Bolshakov.

In the TWAC-ITEP project the accumulation of the heavy ions is produced in the vacuum chamber of the proton synchrotron ITEP U-10. The beam energy is defined by accumulating ions, which depends on the emittance – the available value of the phase space for the stored ions. In given work we try to enlarge the emittance by suppression of the resonances for tunes of working point 9,33 and 9,25. These resonances take place in the working tune cell because of the nonlinear components in the magnetic field of the E-type magnets. Suppression of resonance harmonics (28-th for the square nonlinearity and 37-th for the cubic nonlinearity of the magnetic fields and 65-th nonlinearity of the sixth degree) is realized by the transposition five E-magnets from the eight. In the new accommodation these harmonics were decreased: 28-th in 25 times and 65-th and 37-th in 5 times.

Рис.2, список лит. 6 наим.

© Институт теоретической и экспериментальной физики, 2004.

1. Введение.

При реконструкции протонного синхротрона ИТЭФ из магнитной структуры синхротрона были удалены 14 фокусирующих **X** блоков, из-за чего возник дефицит фокусирующих блоков, который был устранён переделкой восьми лишних **C** блоков в фокусирующие блоки закрытого типа, так называемые **E** блоки [1]. Однако, качество магнитного поля на новой равновесной орбите в этих блоках оказалось значительно хуже, чем в стандартных **C** блоках.

После перевода ускорителя У-10 из режима ускорения в режим накопления ионов по проекту ТВН [2] низкое качество поля в Е блоках стало ограничивать количество накопленных ионов [3]. В данной работе рассмотрена возможность увеличения динамической апертуры вакуумной камеры У-10 с помощью перестановки Е блоков. Новое размещение подбирается так, чтобы величины 28-ой гармоники квадратичной нелинейности магнитного поля, 37-ой гармоники кубической нелинейности и 65-ой гармоники от нелинейности шестой степени создаваемые нелинейными компонентами магнитного поля Е блоков стали бы значительно меньше. При этом подавляются находящиеся на частотах 9,33, 9,25 и 9,286 в рабочей клетке частот нелинейные резонансы, что, несомненно, должно привести к увеличению динамической апертуры в камере накопителя.

2. Характеристики магнитного поля в Е-блоках.

Характеристики магнитного поля в Е блоках взяты из работы [4] и в виде коэффициентов при степенном ряде для относительных отклонений магнитного поля даны ниже в таблице 1. Приведенные в таблице 1 коэффициенты соответствуют: C_2 - квадратичной нелинейности, C_3 – кубической нелинейности и C_6 - нелинейным отклонениям шестой степени.

Так как среднее значение нелинейных компонент даёт вклад только в структурные гармоники, на которые перестановка блоков вообще не влияет, то в таблице 1 приведены также нелинейные компоненты «C_2», «C_3» и «C_6» оставшиеся после вычета их средних значений.

В таблице 1 даны старое и новое размещение Е блоков, в котором только 5 блоков должны быть переставлены, в соответствии со схемой, показанной на рисунке 1. В этой схеме 308 ,408 и 808 блоки остаются на старых местах, блоки – 508 и 708 меняются местами, остальные три блока циклически переставляются - 108 сдвигается на соседнее 208 место, 208 блок переставляется на место 608-го блока, который переносится на место 108.

Таблица 1.

№ блоков, по факту.	C_2 (m^{-3})	«C_2» (m^{-3})	C_3 (m^{-4})	«C_3» (m^{-4})	C_6 ($m^{-7}.10^8$)	«C_6» ($m^{-7}.10^8$)	Оптимальное Размещение блоков
108	1,11	0,397	82	30	1,208	0,548	608
208	1,16	0,447	88	36	1,033	0,373	108
308	0,71	-0,004	-9,5	-61,5	0.1758	-0,484	**308**
408	-0,29	-1,004	-29,5	-81,5	-1,164	-1,824	**408**
508	0,52	-0,193	-24,5	-76,5	-1,208	-1,868	708
608	0,70	-0,014	136	84	2,417	1,757	208
708	0,91	0,196	69	17	1,340	0,680	508
808	0,89	0,176	106	54	1,472	0,812	**808**

Новое размещение является оптимальным, так как оно минимизирует величины резонансных гармоник нелинейностей магнитных полей Е блоков, используя при этом только свойства симметрии этих гармоник. Подавление резонансных гармоник приводит к увеличению размера доступного для пучка места в клетке бетатронных частот и к значительному увеличению аксептанса вакуумной камеры накопителя. Оба эти фактора, в конечном счёте, приводят к заметному увеличению интенсивности накопленного ионного пучка.

Из таблицы 1 видно, что новое размещение Е блоков по сравнению со старым уменьшает 28-ю гармонику квадратичной нелинейности в ~ 25 раз, 37-ю гармонику кубической нелинейности и 65 гармонику нелинейности шестой степени в ~5 раз каждую. Попадающая в клетку частот 64-я гармоника нелинейности шестой степени даёт структурный резонанс на частоте 9,143, и по этой причине перестановки Е блоков на нее не влияют.

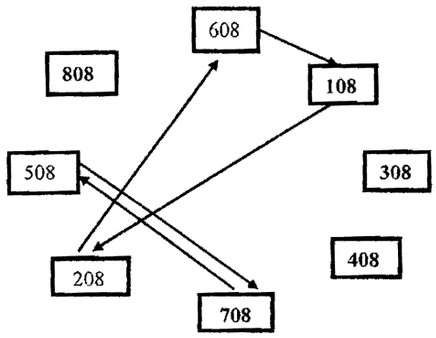

Рис.1

3.Результаты расчётов.

Для подтверждения аналитических расчётов резонансных гармоник в реальных условиях проведены расчёты динамической апертуры по программе MAD [5]. При этом считалось, что С блоки идентичны друг другу, а их магнитные характеристики рассчитывались по программе POISSON [6]. Для нахождения физически обоснованного времени расчёта учтём, что в программе MAD не учитывается влияние собственного поля пучка и, что более важно, не учитываются случайные или закономерные события, меняющие траекторию движения исследуемого иона. К числу случайных событий относится рассеяние на атомах остаточного газа, а к числу закономерных событий - инжекция в камеру накопителя новой порции ионов, изменяющая параметры движения каждого иона. Так как инжекция происходит с частотой 1 Гц, то длительность счёта не должна превышать 1с, т.е., не должна превышать $\sim 10^6$ оборотов пучка в камере накопителя. Для расчета динамической апертуры число оборотов пучка в камере накопителя было выбрано равным 10000, увеличение счёта до 20000 практически не повлияло на результаты расчетов.

Сравнение динамической апертуры - ε при старом размещении Е блоков и при новом при различных частотах бетатронных колебаний в пределах рабочей клетки частот, показано в таблице 2 и на рисунке 2.

Таблица 2

Q_x	ε (мм.мрад)	ε (мм.мрад)	ε (мм.мрад)
$Q_y = Q_x + 0{,}07$	Старое размещение	Новое размещение	«Идеальные» Е блоки
9,05	55	55	65
9,10	65	65	65
9.15	50	70	70
9.20	70	70	70
9.25	45	65	65
9.30	~1	60	70
9.35	30	65	70
9.40	60	70	70
9,43	0	0	0

Заметим, что уменьшение гармоники квадратичной нелинейности в ~ 25 раз эквивалентно увеличению динамической апертуры камеры в это же число раз. Тогда 1 мм.мрад должен был бы, как минимум, возрасти до 25 мм.мрад. В свою очередь, уменьшение силы 65-ой гармоники нелинейного поля шестой степени в 5 раз должно привести к увеличению динамической апертуры в 1,7 раза. В результате, это фактически, и произошло.

Был также выполнен расчёт динамической апертуры для виртуального случая, в котором магнитные характеристики Е блоков абсолютно одинаковы. Полученный в этих расчётах аксептанс камеры практически совпал с аксептансом, полученным для оптимизированной расстановки реальных Е блоков. Тем не менее, из таблицы 2 видно, что в зоне действия нелинейных резонансов при $Q_x = 9{,}3$ небольшой провал в динамической апертуре (~15 %) при новой расстановке Е блоков, по сравнению с результатом для «идеальных» Е блоков, всё же имеет место. Этот провал может быть следствием воздействия остатка 65 гармоники нелинейного поля шестой степени, создающей резонанс на частоте 9,286.

Таким образом, проведенные расчёты подтвердили правильность новой расстановки Е блоков, при которой подавлены самые значимые нелинейные резонансы в рабочей клетке бетатронных частот.

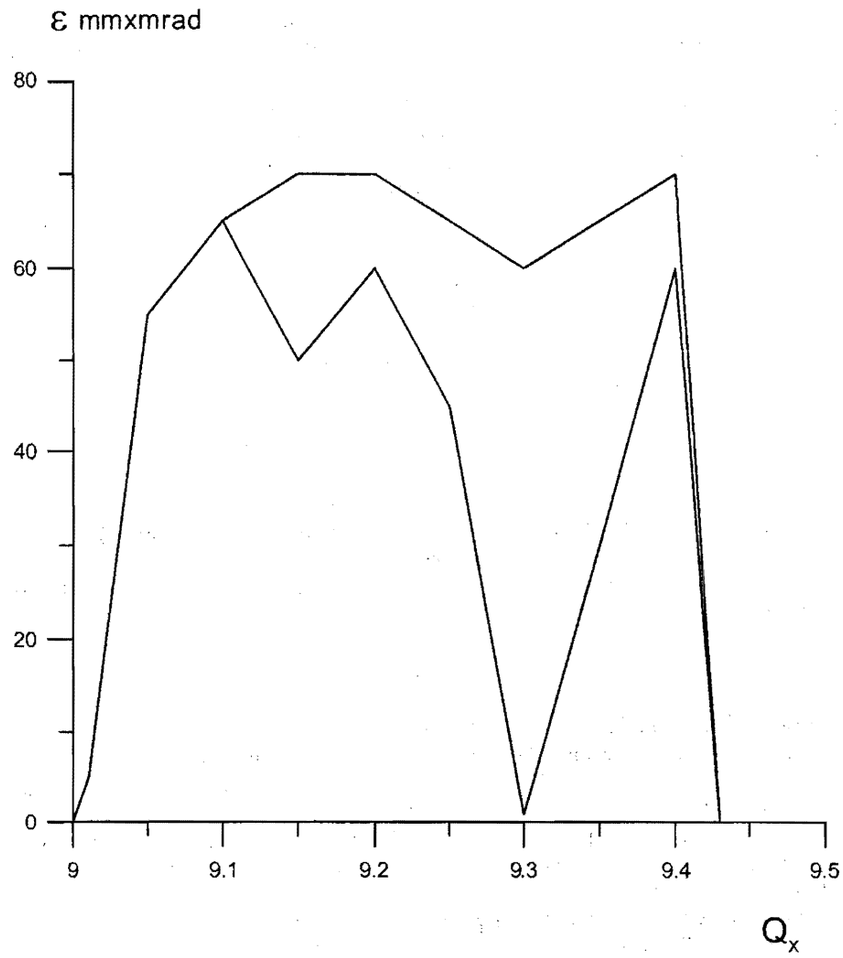

Рис. 2

Верхняя кривая показывает зависимость эмиттанса пучка от положения частоты в рабочей клетке частот для оптимизированного размещении Е-блоков, нижняя кривая то же, но при существующем размещении Е-блоков.

4.Заключение.

В отличие от старой расстановки, при которой аксептанс камеры ограничен величиной ≤40 мм.мрад., полученный в оптимизированном варианте расстановки Е блоков аксептанс обеспечивает величину эмиттанса пучка ≈ 65 мм.м.рад. Последнее означает, что, после перестановки Е блоков в соответствии с указанной на рис.1 схемой, в камере У-10 заведомо можно получить проектный уровень энергии ~100 кДж. Заметим, что при существующей расстановке Е блоков практическим пределом для накопленной энергии является ≈ 35кДж. Выигрыш в величине накопленной энергии обусловлен двумя факторами: ростом аксептанса камеры в 1,5 раза и увеличением в ≈ 2 раза допустимого сдвига бетатронных частот из-за увеличения свободного от резонансов места в пространстве рабочей клетки частот бетатронных колебаний.

В то же время, нужно отметить, что получение столь большой энергии ионного пучка возможно лишь при условии значительного сокращения времени накопления. Ограничение времени накопления необходимо для ослабления влияния процесса внутрипучкового рассеяния. Сокращение времени накопления возникает под действием двух факторов: из-за увеличения частоты работы инжекционной системы и увеличения энергии инжекции. В дальнейшем, при использовании обеих этих факторов (предполагается увеличение частоты работы инжектора от 1Гц до 10Гц (или даже до 5 Гц) и увеличение энергии инжекции от 1,3 Мэв/н до 7 Мэв/н) накопление ~100 кДж в камере У-10 становится вполне возможным.

Литература.

1. Барабаш Л.З. и др. Препринт ИТЭФ- 611, М.1968.
2.Кошкарёв Д.Г., Алексеев Н.Н., Шарков Б.Ю."Модернизация Ускорительно-Накопительного Комплекса ИТЭФ-Проект ИТЭФ-ТВН", в сб. 15-ое совещание по ускорителям заряженных частиц. Протвино, октябрь 1996, т.2, 319-321.
3.Алексеев Н.Н., Кошкарёв Д.Г., Шарков Б.Ю."Нелиувилиевское накопление ядер углерода в ускорительно-накопительном комплексе ИТЭФ", Письма в ЖЭТФ,2003,т.77, вып.3,149-152.
4. Большаков А.Е., Зенкевич П.Р. Препринт ИТЭФ-26-00, М.2000.
5. H.Grote, C.Iselin. The MAD program, CERN/SL/90-13.
6. Los Alamos National Laboratory report, LA-UR-96-1834.