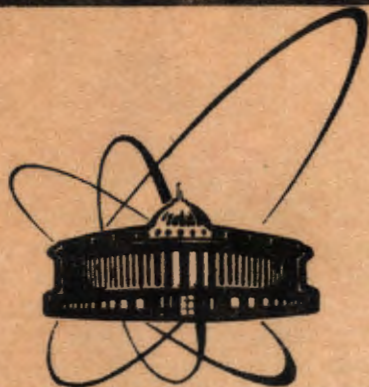


88-644



сообщения  
объединенного  
института  
ядерных  
исследований  
дубна

Д 67

P9-88-644 e+

А.М.Донягин, И.А.Елисеева, А.Д.Коваленко

АНАЛИЗ И КОРРЕКЦИЯ  
ПОГРЕШНОСТЕЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ  
СП-ДИПОЛЕЙ НУКЛОТРОНА

1988

С 1986 года в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ развернуто строительство сверхпроводящего синхротрона релятивистских ядер — нуклотрона, который должен обеспечить возможность ускорения ядер вплоть до урана до энергии 6 ГэВ на нуклон<sup>1/1</sup>. Магнитная система нуклотрона включает в себя 96 дипольных магнитов, 48 квадрупольных линз, предусматривается также создание мультипольных корректоров. Дипольный магнит типа "оконная рама", разработанный для этого ускорителя<sup>1/2'</sup>, состоит из железного яра и расположенной внутри зазора сверхпроводящей обмотки. Размеры окна (56,2 x 144) мм<sup>2</sup>, физическая длина магнита ~ 1440 мм. Для изготовления обмотки используется трубчатый сверхпроводящий кабель, представляющий собой мельхиоровую (медную) трубку с диаметром отверстия 3,6 мм, по наружной поверхности которой проложены сверхпроводящие проводники. СП-проводники закрепляются металлическим бандажом, поверх которого наложена электрическая изоляция. Из этого кабеля на специально созданном оборудовании изготавливаются седлообразные полуобмотки, состоящие из восьми витков, расположенных в два ряда, а затем из двух полуобмоток окончательно формируется обмотка дипольного магнита.

Для обеспечения устойчивой динамики пучка в жесткофокусирующем синхротроне и уменьшения потерь частиц при ускорении необходимо выдержать достаточно строгие допуски на однородность магнитного поля в дипольных магнитах и градиента в квадрупольных линзах в пределах рабочей области апертуры камеры и в диапазоне времени от инжекции частиц в камеру синхрофазотрона до (и в течение) вывода ускоренного пучка в каналы. Кроме заданных допусков на нелинейности (интегральные по длине магнитных элементов), необходимо выдержать в пределах  $\sim 10^{-4}$  разбросы эффективных длин диполей и  $\sim 10^{-3}$  квадрупольей, положение медианной плоскости в диполях и совпадение магнитной и геометрической осей квадрупольей.

Удобным и наглядным способом анализа качества магнитного поля в структурных магнитных элементах синхротронов является метод гармонического анализа, который дает выражения для компонент индукции в виде фурье-разложения:

$$\left. \begin{aligned} B_r &= \sum_{n=1}^{\infty} n r^{n-1} (a_n \cos n\phi + b_n \sin n\phi) \\ B_\phi &= \sum_{n=1}^{\infty} n r^{n-1} (-a_n \sin n\phi + b_n \cos n\phi) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $r, \phi$  — радиус-вектор и полярный угол цилиндрической системы координат, ось  $z$  которой совпадает с продольной осью магнитного элемента, а центр — с центром апертуры.

Коэффициенты  $a_n, b_n$  имеют смысл производных магнитного поля в центре системы и могут быть с высокой точностью непосредственно измерены с помощью индукционных измерительных катушек (рамок)<sup>/3/</sup>.

В зависимости от типа магнитного элемента (его симметрии) в гармоническом спектре (1) будет выделен по величине только один из коэффициентов  $a_n, b_n$ .

Допуски на погрешность поля структурных элементов (диполей и линз) нуклотрона, рассчитанные исходя из допустимых величин искажения орбиты, сдвигов частот бетатронных колебаний и их резонансов, приведены в табл. 1<sup>/4/</sup>.

Таблица 1

Допуски на погрешности магнитного поля структурных магнитов и линз нуклотрона

№№ пп	Тип нелинейности	Значение при $r = 40$ мм		Примечание
		диполь	линза	
1.	Косой квадруполь	$2 \cdot 10^{-4}$	$10^{-4}$	среднеквадратичное
2.	Прямой секступоль	$5 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	среднее
		$4 \cdot 10^{-4}$	$10^{-3}$	среднеквадратичное
3.	Косой секступоль	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	—
4.	Прямой октуполь	$5 \cdot 10^{-4}$	$10^{-3}$	—
		$3 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	среднее
5.	Косой октуполь	$3 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	—
6.	Прямые мультиполи высшего порядка ( $5 \div 10$ гармоники)	$10^{-4}$	$10^{-4}$	среднее

Термин "прямой" соответствует вертикальному направлению поля в идеальном диполе, а "косой" — горизонтальному, и, соответственно, для квадрупольной линзы — наличие вертикальной дипольной составляющей в плоскости горизонта (при  $\phi = 0$ ). При выбранной системе отсчета коэффициенты  $b_n$  соответствуют прямым мультиполям, а  $a_n$  — "косым".

Условия табл. 1 определяют, помимо требований к качеству магнитных элементов, высокие требования к измерительной системе. Для проведения указанных измерений создан автоматизированный стенд на линии с ЭВМ MERA 60-30, на котором ранее были проведены исследования магнитных элементов модельного СП-синхротрона СПИН<sup>/5/</sup>. Для исследования магнитов и линз нуклотрона разработаны и изготовлены

новые блоки измерительных катушек, проведен ряд усовершенствований электронной аппаратуры и программного обеспечения.

Измерительный блок для дипольного магнита состоит из трех пар идентичных плоских катушек (основной и компенсирующей) в виде рамок со средними размерами  $12 \times 600$  мм (чувствительных к азимутальной составляющей поля).

Чувствительность каждой пары катушек к основному (дипольному) полю может быть подавлена в 1000 раз. Секционирование позволяет определять величины гармоник поля отдельно в центральной части диполя и с учетом лобовых частей магнита. В режиме без компенсации проводится измерение амплитуды основной гармоники поля и ее фазы с точностью  $0,1^\circ$ , а также взаимная фазировка первой и третьей гармоник.

Эффективная длина магнита ( $l_{эф}$ ) рассчитывается по данным измерений тремя катушками, перекрывающими по длине весь магнит, и по известной величине основной гармоники поля, измеренной центральной катушкой. Для коррекции возможных долговременных нестабильностей аппаратуры в этих измерениях используется реперный магнит с образцовой измерительной катушкой, включаемый последовательно с исследуемым. Такая система измерений позволяет выдержать заданную точность  $(1 \div 2) \cdot 10^{-4}$  при определении разброса  $l_{эф}$ .

Долговременная работа с измерительной аппаратурой на стенде показала, что воспроизводимость результатов измерений находится на уровне  $\sim 10^{-5}$  (при измерении гармоник поля), при этом обеспечивается точность относительных измерений неоднородностей полей не хуже  $1 \cdot 10^{-4}$ .

В ходе магнитных измерений серийных дипольных магнитов нуклотрона были выявлены образцы магнитов, у которых относительная величина второй гармоники достигала  $10^{-3}$ , превышая тем самым более чем на порядок установленный допуск. Появление четных гармоник в спектре магнитного поля дипольного магнита связано с нарушениями симметрии распределения магнитного потока. Для диполей типа "оконная рама" поле формируется железным ярмом и расположенной внутри него токовой обмоткой (рис. 1), поэтому вклад в асимметрию магнитного потока будут вносить неточности изготовления ярма (перекос полюсов) и погрешности изготовления и монтажа токовой обмотки (асимметричное расположение витков, сдвиги правой и левой частей обмотки относительно осей координат).

Как показали механические измерения, точность изготовления ярма магнитов нуклотрона весьма высока — отклонения размеров окна справа и слева не превышают 50 мкм при высоте рабочего зазора 56,2 мм по всей длине. Поэтому более детальному анализу погрешностей, вносимых обмоткой, и посвящена данная работа.

Модель, предложенная нами, сводилась к тому, что соответствующий мультиполь в измеренном спектре диполя представлялся в виде тонких токовых слоев, расположенных вблизи полюсов магнита, и рас-

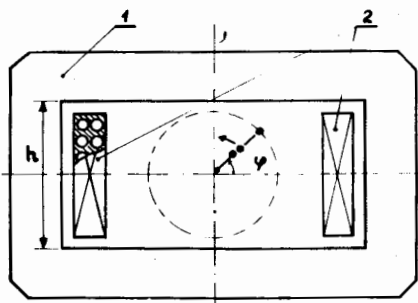


Рис. 1. Дипольный магнит и измерительная катушка в разрезе: 1 — железное ярмо, 2 — обмотка магнита из трубчатого сверхпроводящего кабеля.

смагивались возможные вертикальные смещения или перекосы обмотки диполя, которые могли создать данный мультиполь. В частности, появление "косого" квадруполя, как видно из рис. 2, связано со смещением

обмотки вверх (вниз) относительно горизонтальной плоскости симметрии магнита, а появление "косого" диполя — с перекосом обмотки.

Для количественной оценки величины смещения обмотки ( $\delta$ ) были проведены измерения гармонического спектра магнитного поля, созданного четырьмя тонкими проводниками, расположенными в углах окна магнита (см. табл. 2) при различных способах их включения по направлению тока:  $(++--)$ ,  $(--++)$ ,  $(+--+)$ ,  $(-+-+)$ . На основе известных средней плотности тока в обмотке ( $I_0 w/h$ ) и тока в дополнительных проводниках  $I_a$  величина смещения выразится как:

$$\delta \approx \frac{(a_n)_o}{(a_n)_a} \cdot \frac{I_a}{I_0 w} \cdot h, \quad (2)$$

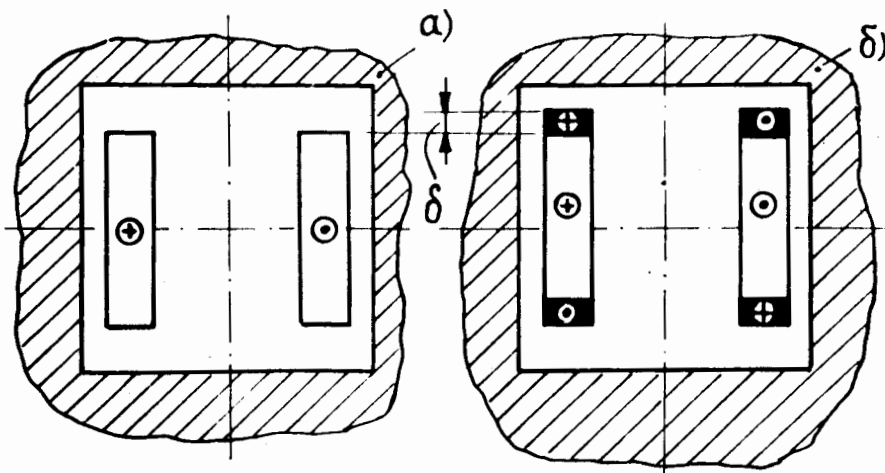


Рис. 2. Появление "косого" квадруполя (б) при сдвиге обмотки вверх на величину  $\delta$  в исходной симметричной системе (а). Знаки  $\oplus$  и  $\ominus$  символизируют противоположное направление тока.

Таблица 2

Гармоники магнитного поля при различных способах включения реперных проводников (данные нормированы на  $I = 100$  А и  $r = 18,9$  мм)

№ гарм.	"Косой" диполь				"Косой" квадруполь			
	$(++--)$		$(--++)$		$(+--+)$		$(-+-+)$	
ампл.	фаза	ампл.	фаза	ампл.	фаза	ампл.	фаза	
(Гс)	(град.)	(Гс)	(град.)	(Гс)	(град.)	(Гс)	(град.)	
1.	4,944	-89,29	4,941	90,74	0,096	85,83	0,102	-96,74
2.	0,103	-104,45	0,105	76,47	5,292	90,66	5,296	-89,34
3.	2,813	-89,09	2,811	90,85	0,043	55,17	0,049	-124,28
4.	0,032	174,18	0,023	-9,31	0,975	90,89	0,972	-89,37
5.	0,224	-88,90	0,224	87,51	0,085	-20,55	0,088	155,61
6.	0,023	154,61	0,021	-9,85	0,029	30,18	0,018	-132,31
7.	0,024	125,81	0,022	-43,41	0,013	12,08	0,015	-159,03

где  $(a_n)_o$  и  $(a_n)_a$  — соответственно величины гармоник поля данного мультиполя от основной обмотки и дипольных проводников,  $w$  — число витков обмотки возбуждения магнита.

Если подставить в (2) данные, полученные при измерении реального диполя нуклотрона, то оказывается, что для  $a_2/b_1 \approx 10^{-3}$  достаточно смещения  $\delta \approx 0,1$  мм.

Анализ технологии изготовления обмотки и ее монтажа в магните показал, что неточности такого порядка величины не исключены. В нашем случае технологический вертикальный размер обмотки составляет  $56,0 \pm 0,1$  мм, а высота зазора в магните —  $56,2 \pm 0,05$ ; для фиксации обмотки при монтаже использовались прокладки между ярмом и обмоткой, размещаемые симметрично по одной сверху и снизу.

Для коррекции "косого" квадруполя в диполях в соответствии с изложенной методикой количество и расположение прокладок выбираются исходя из данных "теплых" магнитных измерений. В результате коррекции прокладками величина "косого" квадруполя уменьшена в 5-7 раз и составляет в среднем величину  $1 \times 10^{-4}$ . Данные измерений одного из серийных магнитов при токе возбуждения  $I_0 = 43$  А приведены на рис. 3. Измерения в рабочем сверхпроводящем режиме при питании магнита током до 6300 А показали, что относительные величины четных гармоник сохраняются на том же уровне.

Чрезвычайно важным является исследование "косой" дипольной составляющей поля в магните, которая определяет положение медианной плоскости. Попытки непосредственного измерения горизонтальной составляющей поля на уровне  $\sim 10^{-4}$  от вертикальной даже с помощью

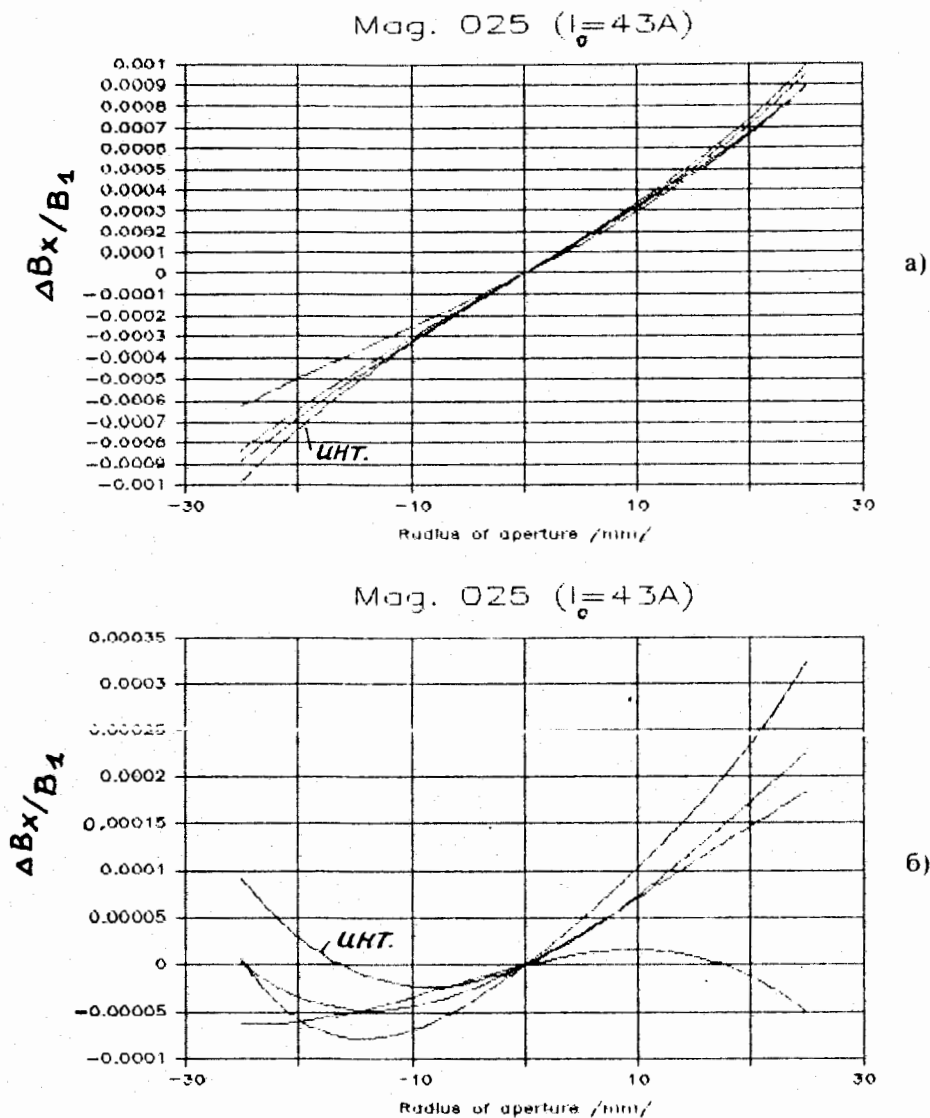


Рис. 3. Относительные величины суммарной "косой" нелинейности в серийном диполе нуклотрона: а - до коррекции, б - после коррекции ("инт." - интегральная величина).

специально разработанных устройств (прецизионных рамок) оказались неудачными. Не обеспечила также заданную точность измерений методика точного определения фазы первой гармоники вращающейся катушкой. Полученная при этом точность  $\approx 0,01^\circ$  примерно в два раза

ниже требуемой. Однако, если считать, что в основном "косая" дипольная составляющая создается за счет вертикального перекоса обмотки в окне магнита, то этот перекося может быть смоделирован с помощью реперных проводников с током, обладающих симметрией "косого" диполя, и при этом получены количественные соотношения между 1, 3, 5 и т.д. гармониками, а также фазовые сдвиги, вносимые измерительными катушками за счет неточности их обмотки, погрешностей намотки и монтажа в измерительном блоке.

Измеряя в режиме с компенсацией косую секступольную составляющую в реальном магните и используя модель, можно довести точность измерения косой дипольной составляющей до величины  $\sim 10^{-5}$ .

Таким образом методика, изложенная в данной работе, дает возможность учесть и в ряде случаев скорректировать погрешности магнитного поля, возникающие вследствие неточности изготовления и установки обмотки в диполях типа "оконная рама".

Мы не обсуждали возможности коррекции прямой секступольной составляющей, поскольку ее величина и характер зависимости от тока возбуждения определяются главным образом конструкцией магнита, а не случайными отклонениями от допусков.

В заключение авторы выражают благодарность Л.Г.Макарову, С.А.Аверичеву, А.А.Смирнову за интерес к работе и поддержку, а также А.А.Кукушкину за помощь в изготовлении измерительных катушек.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Baldin A.M. et al. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. NS-30, No.4, August 1983, p.3247.
2. Smirnov A.A. et al. *J. de Physique*, Col. C1, tome 45, Janvier 1984, p.C1-279.
3. Воеводин М.А., Коваленко А.Д. ОИЯИ, Р9-12233, Дубна, 1979; ОИЯИ, Р9-12378, Дубна, 1979.
4. Василишин Б.В. и др. ОИЯИ, 9-86-512, Дубна, 1986.
5. Борисовская З.В. и др. ОИЯИ, 9-86-714, Дубна, 1986.

Рукопись поступила в издательский отдел  
25 августа 1988 года.

ТЕМАТИЧЕСКИЕ КАТЕГОРИИ ПУБЛИКАЦИЙ  
ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Индекс	Тематика
1.	Экспериментальная физика высоких энергий
2.	Теоретическая физика высоких энергий
3.	Экспериментальная нейтронная физика
4.	Теоретическая физика низких энергий
5.	Математика
6.	Ядерная спектроскопия и радиохимия
7.	Физика тяжелых ионов
8.	Криогеника
9.	Ускорители
10.	Автоматизация обработки экспериментальных данных
11.	Вычислительная математика и техника
12.	Химия
13.	Техника физического эксперимента
14.	Исследования твердых тел и жидкостей ядерными методами
15.	Экспериментальная физика ядерных реакций при низких энергиях
16.	Дозиметрия и физика защиты
17.	Теория конденсированного состояния
18.	Использование результатов и методов фундаментальных физических исследований в смежных областях науки и техники
19.	Биофизика

Донягин А.М., Елисеева И.А., Коваленко А.Д.  
Анализ и коррекция погрешностей магнитного поля  
СП-диполей нуклотрона

P9-88-644

Проведен анализ причин искажений однородности магнитного поля на уровне  $10^{-3}$ - $10^{-4}$  от основного поля в сверхпроводящих дипольных магнитах нуклотрона — жесткофокусирующего синхротрона релятивистских ядер на энергии 6 ГэВ/нуклон, создаваемого в ЛВЭ ОИЯИ. Предложен и экспериментально проверен способ коррекции "косых" гармоник поля (дипольной, квадрупольной и т.д.) в дипольных магнитах типа "оконная рама". Это позволило уменьшить до уровня  $(1 \div 2) \cdot 10^{-4}$  относительную суммарную величину "косых" нелинейностей во всей рабочей области серийных диполей нуклотрона.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1988

Перевод Л.Н.Барабаш

Donyagin A.M., Eliseeva I.A., Kovalenko A.D.  
Analysis and Correction of Magnetic Field Inhomogeneities  
in the Super-Conducting Dipoles of the Nuclotron

P9-88-644

The sources of magnetic field inhomogeneities at a level of  $10^{-3}$ - $10^{-4}$  to the main field harmonic in the superconducting dipole magnets of the Nuclotron, a 6 GeV/nucl. strong focusing synchrotron for relativistic nuclei, which is being constructed at the Laboratory of High Energies, have been analyzed. The way of correction of skew harmonics (dipole, quadrupole etc.) in the "window frame" type of dipole magnets was suggested and tested. This allowed the ratio of the sum of skew nonlinearities to the main harmonic to be decreased to  $(1-2) \times 10^{-4}$  in the working aperture for serial dipole magnets of the Nuclotron.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1988