

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
Ордена Ленина Сибирское отделение  
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ им. Г.И. Будкера

Г.С. Виллевальд

ИЗМЕРЕНИЕ ПОЛЕЙ В 5Тл МАГНИТАХ  
И КВАДРУПОЛЬНЫХ ЛИНЗАХ

ИЯФ 2007-7

Новосибирск  
2007

## **Измерение полей в 5Тл магнитах и квадрупольных линзах**

*Г.С. Виллевальд*

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера  
630090, Новосибирск, Россия

### **Аннотация**

В работе описываются результаты измерения магнитных полей в поворотных магнитах протонного синхротрона на энергию 200 МэВ [1], в квадрупольных линзах, а также описываются результаты исследования влияния вакуумной камеры (нержавеющая сталь с толщиной стенки 0.2 мм) на распределение полей в апертуре при различных длительностях импульсов тока. Приводятся варианты коррекции поля в апертуре магнитов.

© *Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН*

---

Исследование топографии магнитных полей на моделях и магнитах протонного синхротрона на энергию 200 МэВ [1] проводилась на специальном измерительном стенде с использованием управляемой от ЭВМ аппаратуры, разработанной в ИЯФ: генератор временных интервалов ГВИ- 8, блоки для измерения импульсных параметров БИИП-4, блоки управления шаговыми двигателями и др.

Измерения проводились с использованием как одиночных индукционных датчиков, перемещаемых в апертурах с помощью координатного механизма, приводимого в действие шаговыми двигателями, так и с помощью матриц, перемещение которых в кривых моделях магнитов производилось с использованием устройства для механических измерений на различных азимутах в апертуре магнитов, показанном на Рис.11 в работе [2], либо вручную с помощью гибкой тяги. При измерениях без вакуумной камеры в апертуре магнита с небольшими зазорами помещалась прямоугольная матрица с 25-ю индукционными датчиками. Датчики наматывались медным проводом диаметром 40 мк на капроновый каркасик диаметром 3.5 мм и высотой 3 мм, длина навивки 2.3 мм, число витков 1300, активное сопротивление  $\sim 180$  Ом. Датчики калибровались в специальном магните с точностью поля  $10^{-4}$ . Сигналы с датчиков через сопротивления  $\sim 150$  кОм подавались на интегратор, управляемый компьютером. Датчики расположены в точках пересечения координат  $r = 0, \pm 3.75, \pm 7.5$  (мм) с координатами  $z = 0, \pm 7.3, \pm 14.6$  (мм). При измерениях с вакуумной камерой использовалась эллиптическая матрица с 17-ю датчиками на координатах:  $r = 0, \pm 2.1, \pm 6.3$  (мм),  $z = 0, \pm 6.5, \pm 13$  (мм). (На Рис.1,б помечены координаты датчиков в прямоугольной матрице). Расположение датчиков в эллиптической матрице понятно из Рис.2. Центральный датчик ( $r = z = 0$ ) смещен на 5 мм от плоскости, в которой установлены все остальные датчики. Максимальные размеры матрицы:  $2r = 18$  мм,  $2z = 34$  мм. Для устранения ошибок, обусловленных нестабильностью системы питания, использовался отдельный опорный датчик, на который нормировались различные измерения.

Измерения в магнитах проводились в десяти фазах импульса тока: от фазы  $\varphi = 3^\circ$ , соответствующей полю  $B_z = 0.3$  Тл до фазы  $\varphi = 90^\circ$ , соответствующей полю 5 Тл. Длительность импульса тока до максимума  $t_u \sim 3$  мс. Относительная точность измерения величин полей не хуже 0.1%.

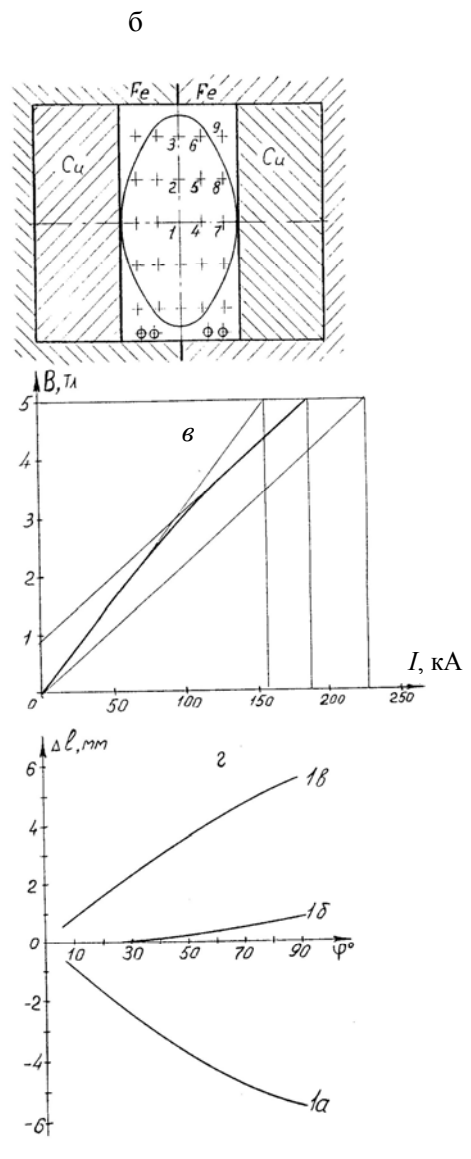
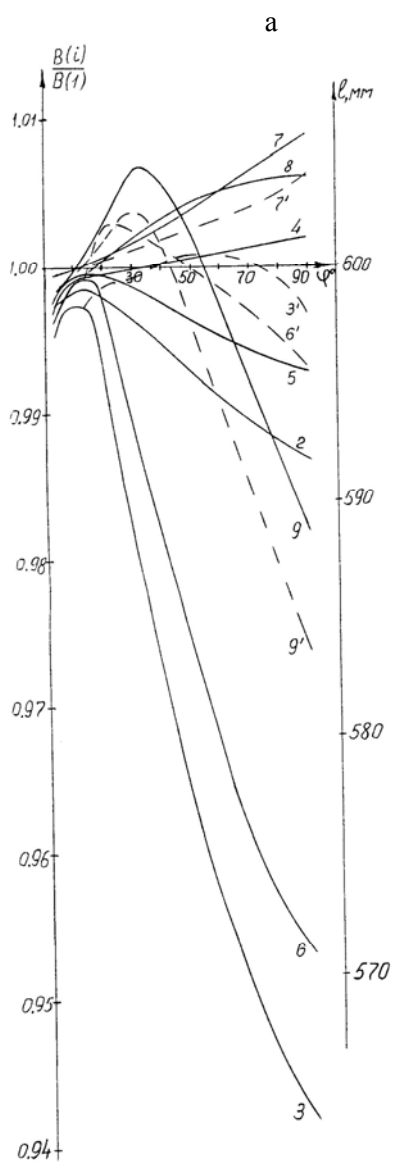


Рис. 1.

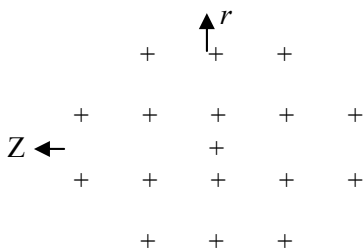


Рис. 2.

Измерения в квадрупольных линзах проводились в шести фазах при токе в линзах 2.7 кА. Измерения проводились внутри вакуумной камеры. Линзы запитывались через дополнительную индуктивность  $L \sim 480$  мкГн, длительность импульсов тока  $\tau_u \sim 1.7$  мс,  $t_m \sim 0.83$  мс.

С помощью измерений было проверено влияние на распределение полей ряда факторов:

1. Влияние вакуумной камеры. В магнитах и линзах использовалась камера из нержавеющей стали X18H10T с толщиной стенки 0.2 мм.
2. Влияние неточностей в сборке железа и шин. Эти искажения выражаются в несимметрии полей относительно осей  $r$  и  $z$ . Как показали измерения, их влияние оказалось существенно меньше 0.1%.
3. Влияние скин-эффектов, токоподводов, эффектов насыщения железа. Их влияние наиболее существенно.

Рассмотрим эти факторы подробнее.

### Влияние вакуумной камеры

На графиках Рис.3 показаны зависимости от фазы степени искажения амплитуды магнитного поля камерой при различных длительностях импульса тока (на графиках указано время до максимума тока,  $t_m$ , в микросекундах). На Рис.3,а показана процентная зависимость от фазы отношения поля в центре апертуры с камерой ( $H_k$ ) к полю в той же точке и при том же токе без камеры ( $H_0$ ) при различных длительностях импульса тока, т.е. зависимость  $[(H_0 - H_k)/H_0]$ . На Рис.3,б показана процентная зависимость отношения максимального искажения поля  $H_k(z)$  при  $r = 0$  к полю  $H_k(r = z = 0)$ , т.е. это отношение  $\Delta H_{\max}(z)/H_k(r = z = 0)$ . Рис.3,в представляет аналогичную зависимость  $H_k(r)$ , т.е.  $\Delta H_{\max}(r)/H_k(r = z = 0)$ .

Из рисунков видно, что экранирование апертуры камерой значительное, особенно на малых длительностях. В ИЯФ исследовался вариант электронного синхротрона при длительности импульса тока  $t_m = 0.5$  мс/ При этой длительности имеет место некоторая задержка роста поля в апертуре, что необходимо учитывать при инжекции и транспортировке частиц; сравнительно выше и энерговыделение в камере, хотя при небольших частотах следования импульсов тока при длительности импульсов тока более миллисекунды влиянием камеры можно пренебречь. (Кстати, в работе [2], на стр. 19, имеет место опечатка: вместо слова миллисекунды напечатано микросекунды).

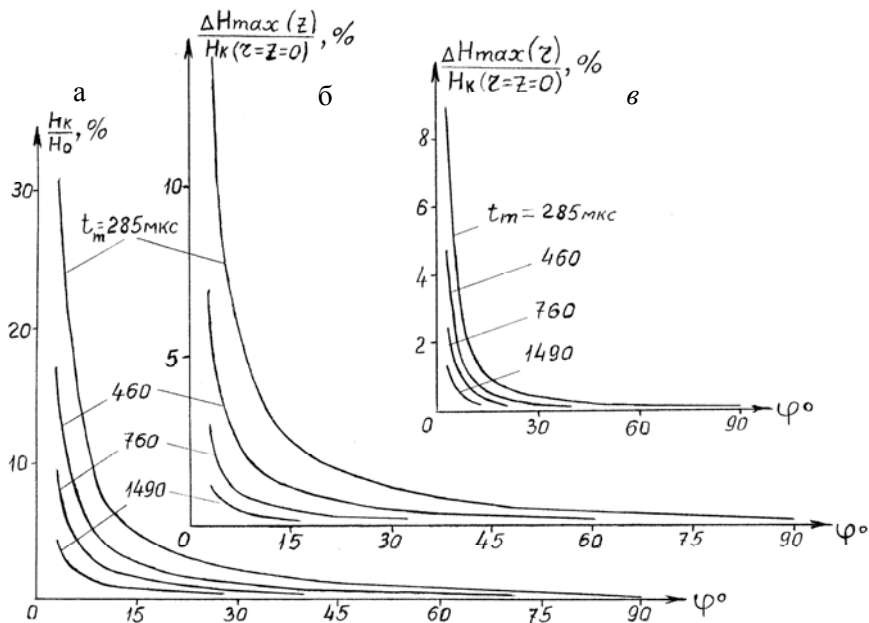


Рис. 3.

Экранирование камерой апертуры можно представить таким образом. Поток поля магнита индуцирует в стенках камеры противоток, процентная величина которого близка к показанной на Рис.3,а. Используя эти данные, можно оценить тепловыделение в камере, допустив, что противоток течет равномерно по всему периметру камеры (реально ток в вершинах эллипса минимален, а вблизи углов апертуры максимален). Толщину скин-слоя в исследуемом диапазоне длительностей можно не учитывать, она больше толщины камеры. При этих допущениях активное сопротивление камеры  $R_k \sim 0.04$  Ом/м. Пример вычисления тепловыделения для случая

$t_m = 285$  мкс покажем с помощью Таблицы 1. В таблице обозначены:  $I_m$  – ток магнита (для простоты форма тока принята синусоидальной), амплитуде тока 200 кА соответствует поле  $\sim 5$  Тл,  $\% I_m$  – доля наведенного тока  $I_H$ . Взяв средний наведенный ток на участках между измерениями и помножив его квадрат на  $R_k$  и на время  $\Delta t$  между измерениями [ $\Delta t = (t_m/90) \cdot \Delta\phi$ ], получим величины энерговыделений на участках  $\Delta t$ . Просуммировав эти величины, получим энерговыделение  $P$  в камере за импульс в Вт на метр длины камеры. Зависимость  $P$  от длительности импульса тока показана в Таблице 2. В таблице показаны минимальные величины  $P$ , реально они несколько больше, т.к. кроме того, что ток течет неравномерно по периметру камеры, не учтены токи, вызывающие местные искажения полей (Рис.3.б,в), реальное сопротивление току больше, следовательно больше и энерговыделение.

Таблица 1

$\phi^\circ$	3	5	9	15	25	40	55	70	80	90
$I_m$ , кА	10.5	17.4	31.3	52	84.5	129	164	188	197	200
$\% I_m$	31	17.5	8.74	4.94	2.77	1.53	0.9	0.5	0.25	0.05
$I_H$ , кА	3.26	3.04	2.74	2.57	2.34	1.97	1.48	0.94	0.49	0.1

Таблица 2

$t_m$ , мкс	285	465	762	1500
$P$ , Вт/м	38	25	14	6

### Измерения в квадрупольной линзе электронного синхротрона

Как уже указывалось, измерения проводились внутри вакуумной камеры (диаметр её  $\sim 35$  мм) при рабочем режиме по току, равном  $I = 2.7$  кА,  $t_m = 0.83$  мс.

В Таблице 3 показана зависимость поля на столике от тока ( $r = 14$  мм), а в Таблице 4 – от радиуса. Обе зависимости практически линейные.

Таблица 3

$I$ , кА	0.106	0.518	0.941	1.37	1.79	2.22	2.64	3.076	3.504
$H$ , кЭ	0.109	0.534	0.977	1.421	1.865	2.31	2.75	3.193	3.633

Таблица 4

$r$ , мм	2	4	6	8	10	12	14
$H$ , кЭ	0.377	0.765	1.154	1.54	1.93	2.35	2,75

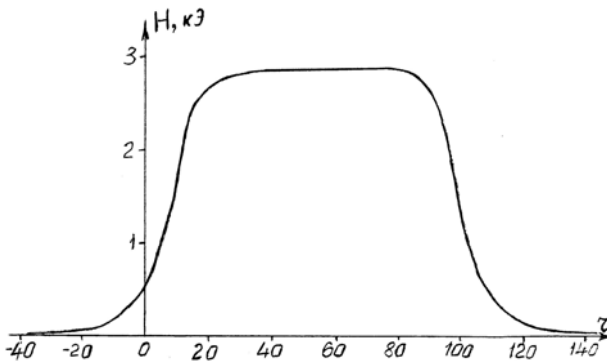


Рис. 4.

На Рис.4 показано распределение поля по продольной координате, снятое на радиальной координате  $r \approx 14$  мм. Координате  $l = 111$  мм соответствует край токоподвода, координате  $l = 0$  – край закоротки. За столик принят участок, ограниченный координатами 30 – 80 мм. При измерениях интегральных длин (в дальнейшем обозначены ИД) шаги на столике принимались равными 12.5 мм, на остальных участках 4 мм. Начало интегрирования 18 мкс, конец 815 мкс. В Таблице 5 представлена зависимость ИД от радиуса и от фазы тока. Существенная зависимость ИД от фазы, наиболее крутая в начальных фазах, наводит на мысль, что поле экранируется камерой. Зависимость ИД от  $r$  на различных участках по длине

Таблица 5

$r \setminus \varphi^\circ$	3	5	10	20	40	90
13.75	93.1	94	95	96	97	98.6
11	94.4	95	96	97.1	98.1	99.56
8.25	95.6	96.5	97.5	98.5	99.5	100.83
5.5	97.1	97.9	98.95	100	101.1	102.4
2.75	98.4	99.5	100.8	102.1	103.5	104.9

линзы (в фазах  $3^\circ$  и  $90^\circ$ ) иллюстрирует Таблица 6, из которой видно, что максимальное изменение величин ИД имеет место на краях линзы, в областях крутого спада поля (см. Рис.4). Зависимость ИД от фазы на столике показывает, что экранирование поля камерой несущественно. Видно, что зависимость полной ИД как от фазы, так и от радиальной координаты, значительная,  $\sim 5 - 6\%$ . Величины возрастания ИД с ростом фазы близки на всех координатах, поэтому это возрастание можно скомпенсировать путем регулировки тока в линзе. Зависимость же от радиальной координаты скорее всего приведёт к снижению качества фокусировки, поскольку снижение ИД примерно одинаково во всех фазах ускорения. Учитывая



меньшее влияние на величину фазового объёма нестабильности ИД на малых координатах, можно попытаться оптимизировать потери, но, к сожалению, с ростом фазы длина растёт, а с ростом  $r$  падает, поэтому компенсация одного (путем регулировки тока) приводит к росту второго.

Таблица 6

$\Delta I, \text{мм}$	$\varphi^\circ$ r	2.75	5.5	8.25	11	13.75
-34 ÷ -18	3	0.5	0.33	0.27	0.23	0.2
	90	0.88	0.68	0.55	0.46	0.4
-18 ÷ -2	3	1.8	1.45	1.26	1.1	0.97
	90	2.95	2.37	2.05	1.75	1.64
-2 ÷ 14	3	7.46	7.1	6.77	6.46	6.23
	90	8.74	8.41	8.15	7.91	7.68
14 ÷ 30	3	15.05	14.94	14.78	14.8	14.8
	90	15.5	15.32	15.19	15.18	15.16
30 ÷ 80	3	50.92	50.94	50.47	49.9	49.82
	90	50.99	50.83	50.44	50.19	50.03
80 ÷ 96	3	14.72	14.62	14.6	14.55	14.53
	90	15.22	15.14	15.07	15.04	15.03
96 ÷ 112	3	6.56	6.45	6.26	5.99	5.61
	90	8.12	7.82	7.63	7.36	7.15
112 ÷ 128	3	1.26	1.12	1.03	0.92	0.8
	90	1.75	1.65	1.53	1.45	1.3
128 ÷ 144	3	0.13	0.15	0.16	0.15	0.14
	90	0.15	0.18	0.22	0.22	0.21
-34 ÷ 144	3	98.4	97.1	95.6	94.4	93.1
	90	104.9	102.4	100.83	99.56	98.6

### Измерения в магнитах

Рис.1,а демонстрирует относительную картину распределения магнитных полей в поперечном сечении апертуры вдали от краев магнита в зависимости от фазы импульса тока. Кривые помечены цифрами  $i = 1 \div 9$ , соответствующими номерам датчиков, а, следовательно, определенным координатам в апертуре (см. Рис.1,б). Величины полей в точках  $i = 2 \div 9$  отнесены к полю в центре апертуры (датчик  $i = 1$ ). Проведем краткий анализ кривых. Наиболее однородное поле во всей апертуре имеет место в фазе  $\varphi \sim 10^\circ$ . Желательно этот момент использовать для инъекции частиц в ускоритель, поскольку обычно при инъекции частицами заполняется максимальная площадь апертуры. Некоторый рост неоднородности в меньших фазах по-видимому объясняется, в основном, динамикой прорастания поля в железо. Рост неоднородности в фазах  $>10^\circ$  обусловлен насыщением железа (максимальный спад поля в точках 3, 6, 2, 5, 1) и

диффузией поля в шины (см. ход кривой 9, где заметно выражены оба эффекта). Ход кривых 3, 6, 2, 5 показывает, что железо и в фазе  $90^\circ$  еще существенно влияет на степень однородности поля в апертуре. С энергетической точки зрения также выгодно использовать железо и при полях 5 Тл, что видно из кривой намагничивания железа, показанной на Рис.1,в. В отсутствии железа для достижения поля 5 Тл потребовался бы ток более 20% выше и значительно большая энергоемкость системы питания. С возрастанием тока область требуемой однородности поля уменьшается, поскольку в процессе ускорения частиц уменьшается размер пучка. Кривые Рис.1,а показывают, что и в фазе  $90^\circ$  имеется довольно большая область поля с невысокой неоднородностью (в круге диаметром  $\sim 15$  мм неоднородность поля не превышает  $\sim 1\%$ , в круге 10 мм  $< 0.5\%$ ).

Одной из важных характеристик магнита является картина интегральных длин на различных координатах апертуры. ИД магнита по равновесной траектории частиц ( $r = z = 0$ ) это длина вдоль магнита, на которой при заданной величине ведущего поля осуществляется поворот частиц на требуемый угол (в рассматриваемом случае  $90^\circ$ ). ИД непостоянны как во времени (зависят от фазы ускорения) так и в пространстве, т. е. на различных координатах. Степень неравенства ИД определяется, в основном, распределением полей внутри магнита (Рис.1,а), хотя существенное влияние имеет и топография краевых полей (область токоподводов, закоронок, прижимных фланцев и т. п.). Знание этих длин позволяет уточнить длину шихтовки железа для обеспечения в данной конструкции магнита поворота частиц на равновесной траектории на  $90^\circ$ , подкорректировать в процессе ускорения ведущее поле с целью сведения к минимуму непостоянства ИД по фазе и др.

С целью удобства анализа результатов измерений определялись относительные ИД, показывающие изменение интегральных длин  $J(i)$  с возрастанием ведущего поля в магните.

$$J(i) = \int \frac{B(i)}{B(1)} dl ,$$

где  $B(i)$  – поле на фиксированной координате в сечении апертуры (Рис. 1,б),  $B(1)$  – поле на равновесной траектории частиц ( $r = z = 0$ ),  $dl$  – элемент длины вдоль равновесной траектории частиц, одинаковый для частиц всех координат, т.е. не учитывается фокусирующий эффект магнита, определяемый разностью длин траекторий частиц, движущихся на различных радиусах  $r$ .

Для сравнения полей в магнитах с различными конструкциями токоподводов и закоронок полезно полные интегралы полей разбить на три части. Первая – регулярная часть (стол) – область максимальной длины с практически не изменяющимся вдоль оси полем, составляет  $\sim 90\%$  полной ИД магнита (принята равной 600 мм). Вторая – область окончания шихтовки магнитопровода – переходная область. Третья – собственно край – включает

в себя закорачивающие шины или токоподводы. Формы зависимостей ИД от фазы в регулярной части магнита совпадают с кривыми Рис.1,а распределения полей, поскольку, как указывалось, длина по азимуту для всех траекторий частиц принималась одинаковой. На Рис.1,а справа показана шкала ИД регулярной части магнита. Кривая  $i=1$  совпадает с осью  $\varphi$ , поскольку именно к полю в этой точке берутся отношения полей в точках  $i = 1 \div 9$ . Полный интеграл магнитного поля по равновесной траектории частиц в магните меняется от 670 мм ( $\varphi = 3^\circ$ ) до 664 мм в фазе  $90^\circ$  (радиус магнита 430 мм,  $\pi*r/2 = 675$  мм). Зависимость от фазы обусловлена влиянием токоподвода (Рис.1,г, кривая 1а) и краевых полей (кривая 1б). В рассматривавшейся конструкции магнита с токоподводом в середине магнита с проникновением поля в шины увеличивается эффективное расстояние между токоподводящими шинами и с насыщением железа в области токоподвода ИД уменьшается на  $\sim 5$  мм. ИД краевых полей с ростом фазы несколько растет (кривая 1б), но этого недостаточно для компенсации, тем более, что в области окончания шихтовки магнитопровода интеграл поля тоже падает (до  $\sim 1.5$  мм). Непостоянство ИД может приводить к потере части радиальной апертуры к концу ускорения. Кроме того, токоподвод вносит заметную несимметрию в картину поля: в точке  $i = 7$  (Рис. 1,б) у изоляционного зазора токоподвода в фазе  $90^\circ$  поле на  $\sim 3\%$  слабее, чем у противоположной шины (сплошной, без разреза), в интеграле это выражается в  $\sim 1.5$  мм. Поэтому расположение токоподвода в середине магнита нежелательно. При заданном законе изменения поля с целью сохранения усредненной по фазам ИД, обеспечивающей поворот частиц на равновесной траектории на  $90^\circ$ , нужно длину шихтовки магнитопровода увеличить на  $\sim 6$  мм. Перенос токоподвода на край магнита меняет картину. Поскольку токоподвод теперь вне шихтованого магнитопровода (в области краевых полей), с насыщением железа интегралы краевых полей растут (кривая 1в), причем величины роста примерно такие же (сравни с кривой 1а), но другого знака. Это обстоятельство, в принципе, можно использовать. Если в области шихтованого магнитопровода на шинах прямого и обратного тока сделать поперечные пазы глубиной  $\sim$  двух скин-слоев (имитация симметричного центрального токоподвода), то изменения ИД могут быть скомпенсированы с точностью не хуже 0.5%. В варианте магнита с боковым токоподводом (разборный вариант магнита [1]) длину шихтованого магнитопровода, для выполнения тех же условий, нужно уменьшить на  $\sim 13$  мм. Краевые поля со стороны токоподвода примерно в 3 раза больше, чем со стороны закоротки, поэтому желательно, чтобы частицы входили в магниты со стороны закоротки.

Рассмотрим некоторые возможности расширения области однородного магнитного поля с помощью корректирующих обмоток, расположенных вблизи полюсов железа (см. Рис.1,б). В принципе, коррекция возможна в широком диапазоне фаз, однако это сопряжено с рядом трудностей.

Во-первых, в различных точках апертуры ход кривых Рис.1,а в зависимости от фазы сильно отличается. Так для коррекции топографии полей в начальных фазах целесообразно использовать спадающую ветвь корректирующего импульса, тогда как в больших фазах следует использовать передний фронт импульса. По этой причине хорошая коррекция не может быть обеспечена одной обмоткой, потребуется ряд поочередно запитываемых обмоток различной геометрии, либо коммутация витков в многовитковой обмотке в процессе ускорения частиц. Во-вторых, витки корректирующих обмоток практически полностью охватывают магнитный поток ведущего поля магнита. В результате источники питания магнита и обмоток оказываются связанными, что усложняет и коммутирующие устройства, особенно при многовитковых обмотках, когда на их концах индуцируются высокие напряжения; велики и механические усилия, действующие на обмотки.

Сравнительно проще обеспечить коррекцию полей вблизи фазы  $90^\circ$ , например, перед выводом пучка из ускорителя. Специально проведенные исследования показали, что, например, в случае вывода пучка по оси  $z$ , при постановке ножа септум-магнита на координате  $z = +15$  мм, коррекцию поля с точностью не хуже 0.5% может обеспечить двухвитковая обмотка, установленная на координате  $z = +18.5$  мм, с расстоянием между прямыми и обратными проводами в витках 10 и 13 мм (радиальные координаты витков  $r = \pm 5$  мм и  $r = \pm 6.5$  мм). При поле в магните 5 Тл корректирующий ток в обмотке равен  $\sim 3.5$  кА. Исследования проводились при длительности синусоидального импульса  $t_k \sim 100$  мкс. Фронт такого импульса существенно искажается, но ввиду сравнительно малой его амплитуды ведущее поле практически не искажается. Момент включения корректирующего импульса подбирался так, чтобы максимумы ведущего поля и корректирующего импульса совпадали. Параметры электрического контура: диаметр провода обмотки 1.5 мм (при увеличении диаметра провода становится заметным экранирование ведущего поля в начальных фазах, подобно вакуумной камере), индуктивность обмотки  $\sim 4$  мкГн, емкость конденсаторной батареи 250 мкФ, напряжение  $\sim 0.5$  кВ.

Обмотки указанной геометрии, установленные на координатах  $z \sim \pm 18.5$  мм, могут обеспечить существенное улучшение топографию полей в рабочей апертуре (внутри вакуумной камеры, контуры которой показаны на Рис. 1,б) не только перед выводом частиц из ускорителя, но и в процессе ускорения частиц. На Рис.1,а прерывистыми линиями показано скорректированное распределение полей в апертуре магнита для случая  $t_k = 0.85t_u$  и совпадения максимумов  $t_k$  и  $t_u$ . Этому условию соответствует включение синусоидального корректирующего импульса в фазе  $13.5^\circ$  импульса питания магнита  $t_u$ . Амплитуда корректирующего импульса сохранена равной 3.5 кА. Разброс полей на координатах, соответствующих положениям датчиков

4, 5 и 8, не превышает 0.1%, кривые практически сливаются с осью и поэтому на рисунке не показаны.

Таким образом, обмотки позволяют значительно уменьшить искажения топографии поля, обеспечить разброс полей в рабочей апертуре  $< 0.5\%$  до фазы  $\varphi \sim 70^\circ$ , что соответствует ведущему полю  $\sim 4.7$  Тл. К фазе  $90^\circ$  разброс на краях апертуры несколько увеличивается, однако при небольших размерах ускоренного пучка это менее существенно.

В работе [2] приведен другой вариант коррекции поля перед выводом частиц. Корректирующие катушки представляют собой по 3 витка, соединенные последовательно. Координаты продольных осей проводов, образующих витки:  $r = \pm 2.7, \pm 5.5, \pm 8.8$  (мм),  $z = \pm 18.8, \pm 17.5, \pm 14.5$  (мм), диаметр провода витков 1.4 мм, амплитуда корректирующего импульса 2.5 кА, длительность импульса  $t_k = 100$  мкс. Поле корректируется на уровне  $\sim 0.5\%$ . В Таблице 7 представлен вариант коррекции при токе в витках 2.7 кА, (поле в магните также 5 Тл, длительность импульса тока в магните  $t_u = 2.5$  мс). Как видно из таблицы, в пределах указанных координат коррекция обеспечивается не хуже 0.4%.

Таблица 7

$r \setminus z$	12	9	6	3	0	-3	-6	-9	-12
6				1.0006	1.004	1.0015			
4	1.0006	.998	.997	.9996	1.0011	1.0009	.999		
2	.998	.9995	.9987	1.0000	1.0009	1.000	1.0000	1.0000	1.002
0	1.025	.9995	.999	.9995	1.0000	.9995	.999	.9997	1.0033
-2			.999	1.0005	1.001	1.0005	1.0000	1.001	1.003
-4			.999	1.0008	1.0015	1.0002	.998		
-6				1.0025	1.0035	1.0005			

В заключение следует заметить, что измерение ИД проводилось без вакуумной камеры. При выборе окончательного варианта магнита, особенно при небольших длительностях импульса тока, желательно промерять ИД с камерой или провести трассировку частиц с целью определения допусков на поля в апертуре.

## Литература

- [1] *И.И. Авербух и др.* Проект малогабаритного протонного синхротрона на энергию 200 МэВ. Труды XI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1989, т. II, с.305.
- [2] *Г.С. Виллевальд, В.Н. Карасюк, Г.И. Сильвестров, Т.В. Соколова.* Экспериментальные сильнополевые поворотные магниты. - Препринт ИЯФ 2006-5. Новосибирск, 2006.

*Г.С. Виллевальд*

**Измерение полей в 5Тл магнитах  
и квадрупольных линзах**

*G.S. Willevald*

**Fields measurement in the 5 Ts magnets  
and quadrupole lenses**

ИЯФ 2007-7

Ответственный за выпуск А.М. Кудрявцев

Работа поступила 19.02.2007 г.

---

Сдано в набор 20.02.2007 г.

Подписано в печать 21.02.2007

Формат 60x90 1/16 Объем 0.8 печ.л., 0.7 уч.-изд.л.

Тираж 95 экз. Бесплатно. Заказ № 7

---

Обработано на IBM PC и отпечатано

на ротапинтере "ИЯФ им. Г.И. Будкера" СО РАН

*Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 11*