

**сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна**

13-86-52

Л.С.Ажгирей, Л.В.Будкин, И.К.Взоров,
С.А.Долгий, Т.Ф.Жмырова, В.В.Иванов,
М.А.Игнатенко, А.С.Кузнецов, А.А.Кукушкин,
Ю.В.Куликов, Г.П.Николаевский, С.В.Разин,
А.Ю.Стариков, Г.Д.Столетов, М.И.Яцута

ИЗМЕРЕНИЯ

ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТА СП12А

1986

ВВЕДЕНИЕ

В исследованиях ядерных взаимодействий, выполняемых на выведенных пучках протонов и ядер синхрофазотрона ОИЯИ, используется двухплечевой магнитный спектрометр с проволочными камерами на линии с ЭВМ ЕС-1010 /установка МАСПИК/^{1/}. В качестве анализирующего магнита в основном плече спектрометра применен типовой электромагнит СП12А, позволяющий отклонять частицы единичного заряда с импульсом 10 ГэВ/с на угол около 10°. Координатно-регистрирующая система спектрометра на базе проволочных камер обеспечивает возможность измерения углов отклонения, с учетом искажающего влияния многократного рассеяния частиц в веществе измерительного тракта установки, с относительной точностью /0,1±0,2%. Чтобы при указанных условиях определить импульс детектируемой частицы с точностью /0,2±0,3%, требуется знание интеграла индукции отклоняющего магнитного поля вдоль ее пути с точностью около 0,1%. С целью получения необходимых для этого данных были проведены описываемые ниже измерения пространственного распределения магнитного поля электромагнита СП12А.

1. ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ АППАРАТУРА

В электромагните СП12А воздушный зазор между полюсами, равный 20 см, реализован путем установки дополнительных полюсных накладок размером 300x50x2,5 см³, поставляемых в комплекте с магнитом. Крепления накладок ограничивают размер свободного пространства внутри магнита в поперечном направлении до 55 см. Поэтому для проведения измерений в возможно большей области поля магнита использовался отличающийся малыми размерами трехкомпонентный нетермостатированный датчик магнитной индукции на основе пленочных преобразователей Холла^{2/}. Расчетная относительная погрешность измерений для этого датчика, согласно^{2/}, не превосходит 0,1%.

Для осуществления контролируемого перемещения датчика было изготовлено с учетом конфигурации магнита специальное транспортирующее координатно-измерительное устройство, которое устанавливалось на плоскость нижнего полюса магнита и юстировалось относительно него с точностью +0,2 мм на базе 300 см. Основание устройства выполнено в виде 5-метровой дюралюминиевой балки несимметричного двутаврового сечения. Нижняя массивная полка

основания являлась опорной, по верхней полке с помощью электропривода перемещалась каретка с поперечными горизонтальной и вертикальной рейками. Горизонтальная рейка могла быть выдвинута влево или вправо по отношению к каретке, а вертикальная передвинута вдоль горизонтальной на расстояния, фиксируемые с помощью отверстий и штифтов с шагом 1 см с точностью $\pm 0,1$ мм. Такие же отверстия в вертикальной рейке предназначались для фиксации на ней датчика магнитной индукции. Направляющие пазы в сочленяемых элементах обеспечивали при перестановках сохранение ориентации датчика в пространстве в пределах $\pm 0,5^\circ$. По длине основания над кареткой натягивалась латунная масштабная лента с отперфорированными в ней с шагом 1 см щелями шириной 0,5 мм. Лента пропусклась в зазор закрепленной на каретке фотосчитывающей головки, сигналы от которой служили метками продольной координаты и использовались для организации триггера измерений. Таким образом шаг изменения координат по трем ортогональным осям измерительного устройства выбирался кратным 1 см.

Блок-схема электронной аппаратуры показана на рис.1. Наряду с преобразователями Холла - ПХ /ПХ1, ПХ2, ПХ3/ трехкомпонентного датчика в измерениях использовался также контрольный ПХ /КПХ/, предназначенный для наблюдения за стабильностью магнитного поля. КПХ был помещен в термостат, обеспечивающий постоянство температуры в пределах $\pm 0,1^\circ\text{C}$. Управляющие токи в ПХ подавались от источников постоянного тока ИТ1-ИТ4 с относительной стабилизацией $\pm 10^{-4}$. Напряжения Холла измерялись цифровыми вольтметрами ЦВ1-ЦВ4 типа TR-1652 при верхнем пределе измерений 200 мВ и чувствительности 20 мкВ. В состав аппаратуры входили блоки КАМАК: интерфейсы ЦВ ИВ-532^{/3/}, входной регистр КР005, регистры констант КР002, счетчик триггирующих сигналов КС002, информация с которых с помощью контроллера типа КК001 и грейдера сигналов Л КУ006^{/4/} передавалась в ЭВМ ЕС-1010 по каналу связи установок МАСПИК^{/5/}.

Работа электронной аппаратуры синхронизовалась с работой координатно-измерительного устройства посредством блока управления /БУ/^{/6/}. В клавишные регистры БУ предварительно заносятся величина шага s /в см/ и число точек измерения d по продольной оси устройства. Цикл измерений начинался после нажатия кнопки "Пуск" на лицевой панели БУ. При этом в ЭВМ выдавался сигнал "Прерывание" и включался электропривод /ЭП/ каретки с датчиком. По первому и каждому s -тому из последующих сигналов от фотосчитывающей головки /ФСГ/ в БУ вырабатывался сигнал "Измерение", подаваемый на ЦВ. По прохождении кареткой d -ной точки осуществлялся реверс электропривода и измерения повторялись при обратном ходе каретки. Цикл измерений заканчивался с возвращением каретки в исходное положение выдачей в ЭВМ сигнала "Конец связи" и выключением электропривода.

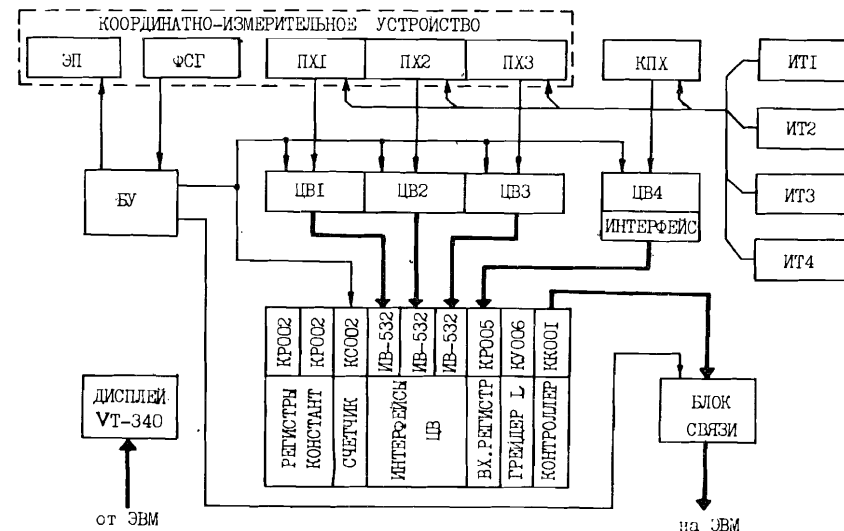


Рис.1. Блок-схема электронной аппаратуры.

2. ПРОЦЕДУРА ИЗМЕРЕНИЙ

Оси X , Y , Z системы координат, в которой проводились измерения, были ориентированы параллельно поперечной, вертикальной и продольной осям магнита соответственно. Компоненты вектора магнитной индукции B_x , B_y /основная компонента/ и B_z измерялись в объеме $50 \times 16 \times 440$ см³ в 18785 узлах пространственной координатной сетки, содержащей: 17 позиций по оси X при шаге, равном 4 см в середине и уменьшающемся в последовательности 2, 2 и 1 см к краям межполюсного зазора; 5 позиций с шагом 4 см по оси Y ; 221 позицию с шагом 2 см по оси Z . Положение $ХОУ$ -сечения координатной сетки относительно полюсов магнита показано на рис.2. Координаты центра магнита X_c , Y_c , Z_c соответственно равны 24,7; 8,0; 220,0 см.

Перед началом измерений преобразователи Холла были прокалиброваны по ядерному магнитометру. Калибровочные соотношения между значениями э.д.с. ПХ и магнитной индукции аппроксимировались полиномами третьей степени, коэффициенты которых вычислялись по методу наименьших квадратов. Отклонение данных калибровки от аппроксимирующих кривых не превышает 0,6 мТл.

Чтобы оценить влияние режима питания магнита на форму пространственного распределения магнитного поля, измерения карты поля были выполнены при трех значениях тока возбуждения магнита: 0,8; 1,1 и 1,5 кА. При каждом токе измерения проводились в два этапа. Вначале координатно-измерительное устройство располагалось слева от продольной оси магнита и измерялись значе-

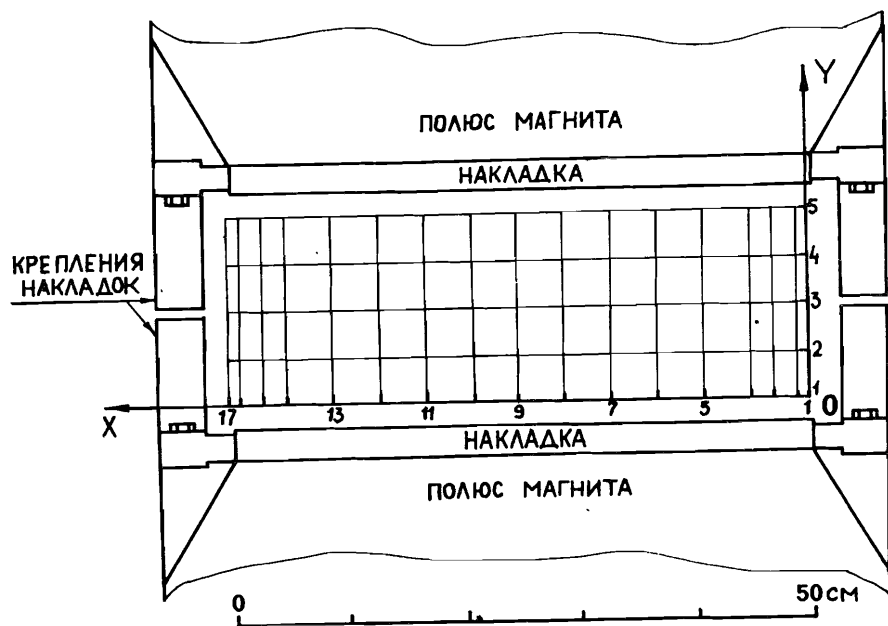


Рис.2. XOY-сечение координатной сетки, в узлах которой измерялись компоненты вектора магнитной индукции. Ось Z направлена от наблюдателя, цифрами обозначены порядковые номера (X, Y) - координат продольных линий Z.

ния магнитной индукции в правой части поля в узлах координатной сетки, лежащих в плоскостях YOZ при $X = X_1 \div X_9$. Затем устройство сдвигалось вправо и выполнялись измерения при $X = X_9 \div X_{17}$. Область перекрытия промеренных частей поля составляли 1105 точек вдоль пяти продольных линий в плоскости при $X = X_9$.

Поступающая в ЭВМ информация подвергалась предварительной обработке и записывалась на магнитную ленту /МЛ/. Результаты цикла измерений могли быть представлены на экране дисплея VT-340 для визуального анализа. При наличии аппаратурных сбоев или сомнениях в правильности принятой информации измерения вдоль данной линии проводились вновь. В дальнейшем записанные на МЛ значения напряжений Холла для прямого и обратного направлений движения датчика усреднялись в каждой точке и с помощью калибровочных соотношений переводились в значения магнитной индукции. Данные, отвечающие левой и правой частям магнитного поля, проверялись на шиваемость в перекрываемой области.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Прежде всего отметим, что воспроизводимое полученными данными магнитное поле обладает симметрией, соответствующей зеркально-симметричной конфигурации магнита СП12А относительно медианных плоскостей. Отклонение от симметрии, оцененное по разности значений индукции в точках у противоположных границ зазора, не превышает 0,4%.

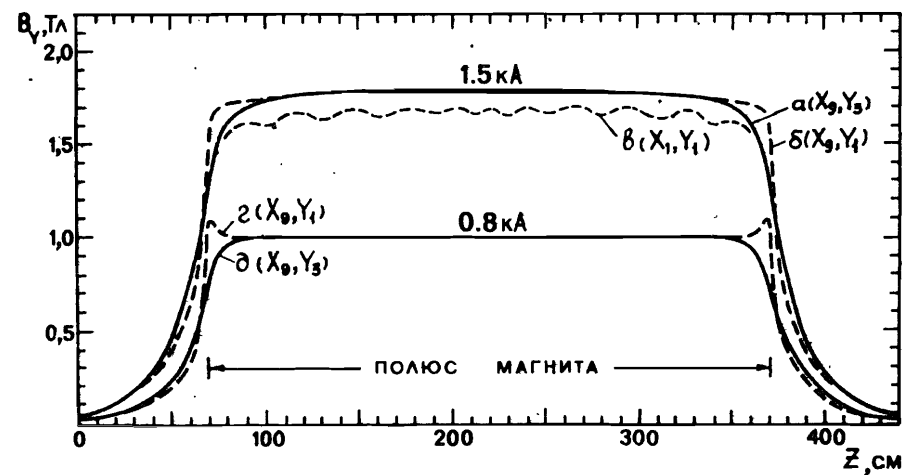


Рис.3. Графики зависимости $B_y(Z)$ - основной компоненты индукции при фиксированных значениях X и Y для токов возбуждения магнита 0,8 и 1,5 кА.

Зависимости основной компоненты индукции B_y от продольной координаты Z при фиксированных X и Y представлены на рис.3 типичными графиками для двух значений тока возбуждения магнита. С увеличением тока магнитное поле заметно деформируется: индукция в середине межполюсного зазора растет быстрее, чем у краев. Так, относительная величина разности значений индукции в центре магнита (B_c) и на расстоянии 1,3 м от центра по продольной оси при токе 0,8 кА составляет меньше 1%, при 1,1 кА - около 2% и при 1,5 кА - около 6%. При неизменных условиях различия между кривыми $B_y(Z)$ проявляются в основном в форме склонов на приграничных участках зазора. Смещение линии наблюдения Z от медианной плоскости магнита к любому полюсу приводит к росту крутизны склонов /см. кривые а/ и б/, г/ и д//, что естественно ожидать ввиду изогнутости сгущающихся у полюсов силовых линий спадающего магнитного поля. При токе 1,5 кА наибольшая крутизна спада поля по продольной оси магнита составляет 0,06 Тл/см, а по параллельной ей линии в двух см от плоскости полюса -

0,16 Тл/см. В 70 см от торцевых границ зазора индукция рас-
сеянного поля во всех случаях не превышает 2,5% от B_c . Вблизи
боковых кромок полюсов наблюдаются некоторые локальные неоднородности поля /кривая в//, обусловленные, по-видимому, особенностями конструкции креплений полюсных накладок.

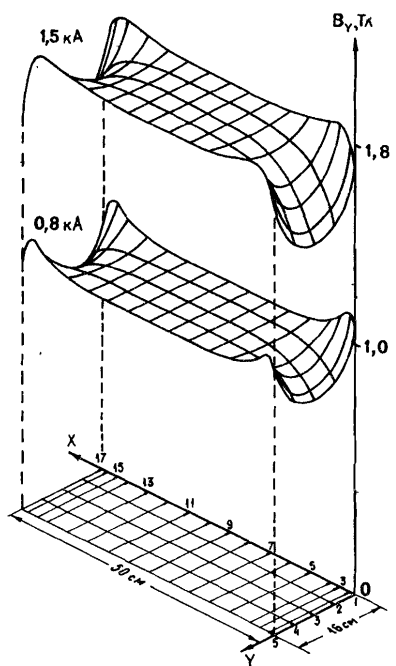


Рис.4. Значения $B_y(X, Y)$ в средней XOY-плоскости магнита при токах возбуждения 0,8 и 1,5 кА.

Характер изменения поля в поперечных направлениях иллюстрирует рис.4, на котором показаны зависимости $B_y(X, Y)$ для средней XOY-плоскости магнита при токах 0,8 и 1,5 кА. Подобную форму имеют также и графики $S(X, Y)$ -интеграла по Z основной компоненты индукции. В срединной области, составляющей от 55% /при 1,5 кА/ до 65% /при 0,8 кА/ промеренного объема, величины $S(X, Y)$ в пределах $\pm 1\%$ совпадают со значением S_c -интеграла индукции по оси магнита. Это обстоятельство и тот факт, что в типичных условиях эксперимента в этой области проходят траектории около 80% регистрируемых частиц, позволяют использовать однородное магнитное поле, индукция которого равна B_c и протяженность $L = S_c/B_c$, в качестве удобной для приближенных расчетов модели реального поля магнита СП12А. Измеренные значения B_c , S_c и L приведены в таблице.

Очевидно, что задача прецизионных измерений импульсов частиц требует аккуратного учета пространственной структуры магнитного поля, заметно неоднородного на периферии рабочего зазора магнита.

Поперечная B_x и продольная B_z компоненты магнитной индукции существенны в относительно небольшой области на краях зазора. Их вклад в отклоняющую силу магнита оценивался путем сравнения углов отклонения ϕ частиц с заданными импульсами для двух вариантов расчета: с учетом всех компонент вектора индукции $\phi(\vec{B})$ и с учетом только основной компоненты - $\phi(B_y)$. Оказалось, что среднеквадратичная относительная погрешность в вычислении угла ϕ при пренебрежении компонентами B_x и B_z составляет около 0,02%. На рис.5 в качестве примера приведено распределение разностей $\Delta\phi = \phi(\vec{B}) - \phi(B_y)$ для протонов с импульсами 3,9÷5,6 ГэВ/с при среднем угле отклонения 0,21 рад. Средне-₅ квадратичное отклонение для этого распределения $\sigma = 4,0 \cdot 10^{-5}$ рад.

Таблица

Основные характеристики поля электромагнита СП12А

Ток возбуждения	Индукция в центре магнита	Интеграл поля по продольной оси	Эффективная длина
$I, \text{ кА}$	$B_c, \text{ Тл}$	$S_c, \text{ Тл}\cdot\text{см}$	$L, \text{ см}$
0,8	1,001	326,8	326,5
1,1	1,373	445,3	324,3
1,5	1,797	573,6	319,2

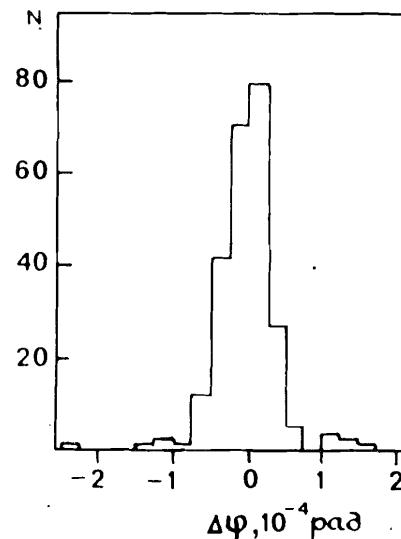


Рис.5. Гистограмма разностей $\Delta\phi = \phi(\vec{B}) - \phi(B_y)$ углов отклонения, вычисленных для протонов с импульсами в интервале 3,9÷5,6 ГэВ/с с учетом всех компонент вектора индукции \vec{B} и только компоненты B_y .

Поскольку учет всех компонент индукции не дает ощутимого выигрыша в точности определения импульса, в дальнейшем учитывалась только основная компонента B_y .

4. ОСОБЕННОСТИ МЕТОДИКИ И ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ

Проводившаяся в ходе измерений обработка информации обнаружила, что данные для прямого и обратного направлений движения датчика на участках неоднородного поля систематически различаются. Характер различий иллюстрирует рис.6, на котором в зависимости от Z-координаты приведены разности $\Delta B_y(Z_i) = (B_y^-) - (B_y^+)$ - значений индукции, измеренных вдоль средней продольной линии при движении датчика соответственно "обратно" и "прямо". Наб-

людаемый эффект был ранее отмечен в /7/ и, по-видимому, вообще характерен для выбранной методики измерений.

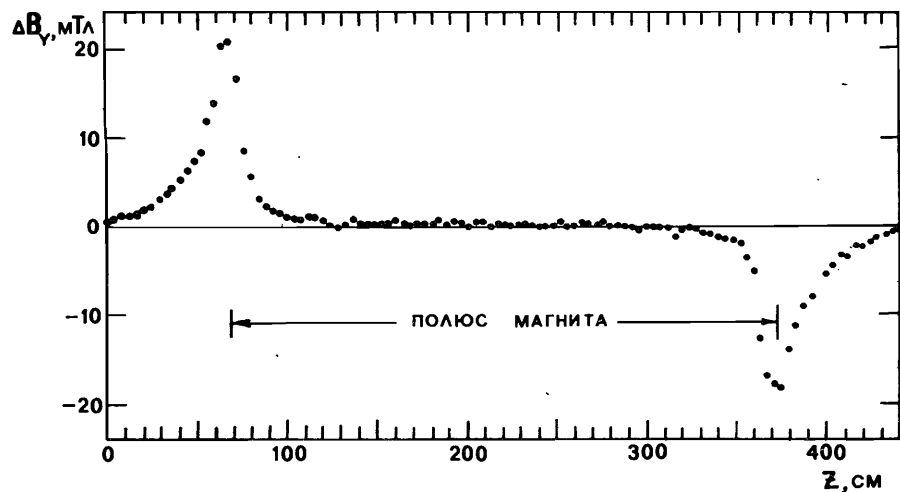


Рис.6. Величины разности ΔB_y значений индукции, измеренных вдоль средней продольной линии Z при движении датчика в противоположных направлениях.

Последующий анализ показал, что для каждой линии обе группы данных представляют одну и ту же функциональную зависимость $B_y(Z)$, если считать, что $(B_y^-)_i = B_y(Z_i + \Delta Z)$ и $(B_y^+)_i = B_y(Z_i - \Delta Z)$. Действительно, с учетом координатного сдвига ΔZ , составившего в нашем случае 1,6 мм, интерполированные значения $B_y^-(Z_i)$ и $B_y^+(Z_i)$ согласуются между собой: их разности распределяются по Z стохастически, в зонах неоднородного поля уровень флуктуаций на порядок меньше разности исходных значений индукции.

Наличие общего для всех точек координатного сдвига подтверждается отчетливо просматриваемой по всей совокупности данных пропорциональностью значений $\Delta B_y(Z_i)$ величинам производной dB_y/dZ при $Z = Z_i$. Это можно видеть, в частности, сопоставив данные рис.6 и кривую а/ рис.3. Такое соответствие свидетельствует о плавном характере функций $B_y(Z)$ и их практической линейности в интервалах $2\Delta Z$. Можно полагать поэтому, что возникшие вследствие сдвигов $\pm\Delta Z$ отклонения измеренных значений индукции взаимно компенсируются при усреднении и не влияют, таким образом, на конечный результат измерений.

С другой стороны, различие сопоставляемых групп данных усложняет процедуру проверки их согласованности с целью исключения возможных ошибок из-за аппаратных сбоях. Алгоритмом, обеспечивающим в этих условиях эффективный контроль с помощью ЭВМ работы аппаратуры и правильности принятой информации,

может служить сравнение интерполированных с учетом координатного сдвига значений индукции $B_y^+(Z_i)$ и $B_y^-(Z_i)$. При этом величину сдвига необходимо определить по данным первых циклов измерений из условия: $\sum_i |B_y^+(Z_i) - B_y^-(Z_i)| = \min$.

Основной причиной выявленной координатной ошибки является преждевременная выдача сигнала "Измерение" от координатного устройства, обусловленная размерами светового луча и чувствительной зоны фотодиода ФСГ, а также шириной щелей в прерывающей луч масштабной ленте. Величина упреждения существенно возрастает из-за диффузного отражения света при недостаточном зачернении стенок рабочего зазора ФСГ и поверхности ленты.

Сдвиг в координате может проявиться и как эффект, связанный с тем, что при движении датчика в неоднородном поле напряжение Холла изменяется во времени. Переходные процессы, происходящие при этом во входных RC-цепях измерительной системы, в той или иной мере отражаются на результатах измерений. В частности /см., например, /8/, если напряжение на выходе RC-цепи изменяется по линейному закону, то на ее выходе оно изменяется по тому же закону с отставанием на постоянную времени цепи $\tau = RC$. В ЦВ TR 1652 при включенном входном фильтре величина $\tau = 50$ мс, что при скорости перемещения датчика 2,5 см/с может имитировать координатный сдвиг 1,25 см. Чтобы избежать этого, измерения выполнялись при отключенных входных фильтрах в ЦВ, несмотря на снижение помехозащищенности последних.

Другим следствием движения датчика в неоднородном поле являются индукционные наводки. Величина имитируемого ими координатного сдвига определяется выражением: $\Delta Z_H = \gamma^{-1} S \cdot dB/dt$, где γ - магнитная чувствительность ПХ, S - площадь петли, образуемой подключенными к электродам ПХ проводами на плоскости, перпендикулярной измеряемой компоненте индукции, и dB/dt - скорость датчика. Это выражение получено в предположении, что $\Delta B_H / \Delta Z_H = dB/dZ$, где $\Delta B_H = U_H / \gamma$ - погрешность измерения магнитной индукции, обусловленная напряжением наводки U_H , а dB/dZ - производная по Z измеряемой компоненты индукции /индекс ее условно опущен/. Расчет показывает, что в измерениях, подобных описываемым, для практически полного подавления влияния индукционных наводок достаточно тщательного переплетения подводимых к датчику проводов. Так, в нашем случае, если даже допустить, что площадь оставшейся нескомпенсированной части петли составляет 1 см^2 , то и тогда величина ΔZ_H будет меньше 0,03 мм.

В противоположность систематическому и закономерному характеру действия рассмотренных факторов, некоторую неопределенность в отсчет координаты вносит флуктуация времени выполнения операции измерения в ЦВ TR 1652. В этом вольтметре реализован принцип аналого-цифровых преобразователей последовательного приближения /ступенчатого уравнивания/, отличающихся высоким быстродействием /время А/Ц-преобразования меньше 1 мс/.

Однако чтобы обеспечить нечувствительность прибора к сетевым наводкам частотой 50 Гц и ее гармоникам, начало преобразования после поступления в ЦВ внешнего пускового сигнала синхронизируется напряжением питающей сети. Отсюда возникает неопределенность ± 10 мс момента измерения и, следовательно, неопределенность $\pm 0,25$ мм отсчитываемой координаты, что, в свою очередь, приводит к погрешности измерения индукции в области больших градиентов. При крутизне спада поля $0,2$ Тл/см наибольшая абсолютная ошибка отдельного измерения может составить 5 мТл. В нашем случае эта величина определяет верхнюю границу флуктуации измеренных значений индукции на малых участках магнитного поля вблизи кромок полюсных наконечников магнита.

В большей части межполюсного зазора, где поле близко к однородному, среднеквадратичное отклонение измеренных для двух направлений движения датчика значений индукции от их полусуммы составляет всего $0,2$ мТл, что соответствует наибольшей чувствительности ЦВ TR 1652. Точность определения величины интеграла индукции по продольным линиям оценивалась путем сравнения групп данных "прямо"- "обратно", и характеризуется среднеквадратичным относительным отклонением $\pm 0,01\%$.

5. АЛГОРИТМЫ ВЫЧИСЛЕНИЯ ИМПУЛЬСА

Данные о магнитном поле использовались при вычислении набора типичных траекторий, представляющих траектории регистрируемых спектрометром частиц. Эти вычисления в конечном счете имели целью выразить в аналитической форме:

$$p = F(X_1, Y_1, X_2, Y_2, \phi) \quad /1/$$

соотношения между импульсом частицы (p) и измеряемыми в эксперименте величинами: (X, Y) -координатами точек прямолинейного "трека" частицы перед магнитом / X_1, Y_1 - в плоскости мишени, X_2 - в плоскости проволочной камеры перед входом в магнитное поле и Y_2 - на выходе из поля / и углом отклонения частицы в магнитном поле (ϕ).

Начальные условия для каждой траектории задавались комбинацией из предварительно выбранных дискретных значений параметров X_1, Y_1, X_2, Y_2 и импульса p , а угол ϕ определялся путем численного интегрирования уравнения движения заряженной частицы в магнитном поле.

По результатам вычислений составлялась таблица соотношений: $(X_1)_i, (Y_1)_j, (X_2)_k, (Y_2)_l, p_m - \phi_{ijklm}$, число которых было равно произведению $N_1 N_2 N_3 N_4 N_5$ -чисел дискретных значений указанных входных параметров, соответственно.

Затем в границах множества значений ϕ_{ijklm} определялись N_5 фиксированных значений ϕ_m , и путем обратной интерполяции строи-

лась таблица соотношений: $(X_1)_i, (Y_1)_j, (X_2)_k, (Y_2)_l, \phi_m - p_{ijklm}$, которая и служила основой для нахождения аппроксимирующей функции /1/ в явном виде /9/.

Точность приближения оценивалась по величине среднеквадратичного отклонения распределения величин $(p - p')/p$, где p - исходные значения импульса при вычислении траекторий, p' - значения импульса, восстановленные с помощью найденной аппроксимирующей функции. Необходимый для такой оценки набор траекторий разыгрывался случайным образом, исходя из равномерных распределений входных параметров в их областях изменения.

Выражение для функции /1/, адекватное точности магнитных измерений, было получено в виде разложения по полиномам Чебышева:

$$p^{-1} = \sum_i \sum_j \sum_k \sum_l \sum_m C_{ijklm} T_i(X_1) T_j(Y_1) T_k(X_2) T_l(Y_2) T_m(\phi). \quad /2/$$

/Значения фигурирующих здесь физических величин нормированы в соответствии с областью изменения аргумента полиномов Чебышева $T_n(X) = \cos(n \arccos X)$ /. Точность приближения с помощью данного выражения при 174 коэффициентах C_{ijklm} составила около $0,08\%$.

Однако при оптимальном приближении разложение по полиномам Чебышева определено, к сожалению, не для всего охватываемого спектрометром интервала импульсов /точнее, углов отклонения ϕ /, а только для средней его части, отвечающей в основном участку 100-процентной геометрической эффективности установок. Несоответствие заданного и действительного интервалов изменения параметра ϕ обусловлено свойствами полиномов Чебышева и процедурой вычисления коэффициентов разложения. Дело в том, что при выполнении этой операции предполагается независимость параметров разложения и требуется, чтобы все их сочетания были представлены в исходных числовых соотношениях. При таком условии граничные значения импульса определяются по самым "неблагоприятным" комбинациям координат входного "трека" частицы и, хотя область промеренного поля с избытком перекрывает рабочее пространство магнита, заданный интервал импульсов /а следовательно, и углов ϕ / оказывается меньше реального.

Для компенсации отмеченного недостатка алгоритм вычисления импульса с помощью разложения /2/ был дополнен выражением, представлявшим импульс частицы в виде разложения по степеням параметров x_2, y_2 и ϕ :

$$p(X_2, Y_2, \phi) = \sum_{k=0}^2 \left(\sum_{l=0}^2 \left(\sum_{m=0}^3 C_{klm} X_2^m Y_2^l \right) \phi^k \right) \quad /3/$$

Параметры X_1 и Y_1 , как наименее существенные, были исключены из рассмотрения, а углы отклонения при разных значениях этих параметров для каждого набора переменных $(X_2, Y_2, \phi)_{klm}$ усреднялись.

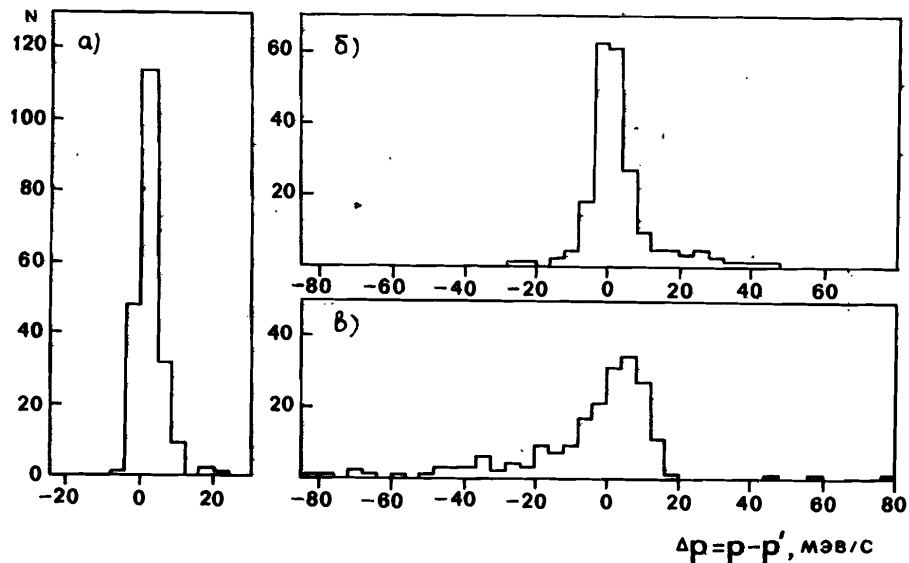


Рис. 7. Гистограммы отклонений $\Delta p = p - p'$, вычисленных значений импульса (p') от заданных (p), полученные для интервала импульсов $3,9 \div 5,6$ ГэВ/с при использовании выражений: а/ - разложения по полиномам Чебышева /174 коэффициента/, б/ - разложения в виде степенного ряда /36 коэффициентов/, в/ - приближения однородного поля /одна константа/.

Выражение /3/, содержащее 36 коэффициентов C_{klm} , при использовании его в качестве самостоятельного алгоритма, обеспечивает точность приближения около 0,2%.

При обработке спектрометрической информации в реальном времени эксперимента использовался наиболее простой и экономный по времени счета алгоритм - "приближение однородного поля": $p = C\phi^{-1}$. В случае, когда учитывается только основная компонента индукции V_y : $C = c \langle \int_L V_y(L) dL \rangle$ эВ/с рад, где c - величина скорости света в вакууме, выраженная в $мс^{-1}$, а $\langle \int_L V_y(L) dL \rangle$ - усредненное по всему набору траекторий значение интеграла индукции по линии движения частиц, выраженное в Тл·м. Точность приближения для этого алгоритма составляет примерно 0,5%.

Для сопоставления возможностей всех перечисленных алгоритмов на рис. 7 приведены соответствующие им гистограммы распределения величин $\Delta p = p - p'$ для интервала импульсов $3,9 \div 5,6$ ГэВ/с.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенных рассмотрений можно сделать следующие основные выводы.

1. Методика измерений магнитного поля движущимся датчиком Холла позволяет обеспечить высокую /до 0,1%/ точность измерений пространственного распределения полей в магнитах, аналогичных электромагниту СП12А.

2. При использовании данной методики в измерениях магнитных полей, отличающихся сложной пространственной структурой и большими значениями градиента индукции, необходимо учитывать возможность влияния на результаты измерений рассмотренных в настоящем сообщении эффектов, возникающих вследствие движения датчика.

3. Проведенные оценки позволяют полагать, что погрешность в определении импульса регистрируемой спектрометром частицы, обусловленная неточностями измерений пространственного распределения магнитного поля электромагнита СП12А и построенного на основе полученных данных оптимального алгоритма вычисления величины импульса, не превышают 0,15%.

Авторы благодарны С.А.Аверичеву за содействие проведению магнитных измерений, Т.И.Волобуевой, Е.А.Матюшевскому и Б.К.Курятникову, участвовавшим в разработке и изготовлении координатно-измерительного устройства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ажгирей Л.С. и др. В кн.: Труды совещания по исследованиям в области релятивистской ядерной физики. ОИЯИ, Д2-82-568, Дубна, 1982, с.83.
2. Долгий С.А. и др. ОИЯИ, 13-82-37, Дубна, 1982.
3. Белякова М.П. и др. ОИЯИ, Р10-85-631, Дубна, 1985.
4. Василев Д. и др. ОИЯИ, Р10-84-860, Дубна, 1984.
5. Ажгирей Л.С. и др. В кн.: Труды X Международного совещания по ядерной электронике. Дрезден, 1980, с.287.
6. Кукушкин А.А., Николаевский Г.П. ОИЯИ, 13-11662, Дубна, 1978.
7. Gajewski W. et al. JINR, E13-6659, Dubna, 1972.
8. Ерофеев Ю.Н. Импульсная техника. "Высшая школа", М., 1984, с.24.
9. Lechanoine C., Martin M., Wind H. Nucl. Instr. and Meth., 1969, vol.69, No.1, p.122.

Ажгирей Л.С. и др.

13-86-52

Измерения пространственного распределения
магнитного поля электромагнита СП12А

Описаны процедура и результаты измерений топографии поля типового электромагнита СП12А, используемого в составе установки МАСПИК для прецизионных измерений импульсов заряженных частиц в экспериментах на пучках синхротрона ОИЯИ. Рассмотрены некоторые особенности примененной методики "движущегося датчика Холла" и предложен алгоритм эффективного контроля информации в ходе магнитных измерений. Приведены соотношения, связывающие импульс частицы с координатами ее траектории в спектрометре и данными о магнитном поле.

Работа выполнена в Лаборатории вычислительной техники и автоматизации ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1986

Перевод О.С.Виноградовой

Azhgirej L.S. et al.

13-86-52

Measurements of Magnetic Field Space Distribution
of SP12A Magnet

A procedure and results of measuring the magnetic field of the SP12A magnet are described. This magnet is used in MASPIC spectrometer for precise determination of charged particle momenta in experiments with JINR synchrotron beams. Some peculiarities of "moving Hall device method" are considered, and the effective algorithm for testing data during the magnetic measurements is given. Expressions for calculating the momentum of a particle from coordinates of its trajectory through the spectrometer with the known magnetic field are given.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1986