

объединенный
институт
ядерных
исследований
дубна

0176 / 2-80

22/12-80
P9-80-578

М.А.Воеводин, В.И.Волков, Л.П.Зиновьев,
А.Д.Коваленко, Н.А.Коруков, И.И.Куликов,
Ю.И.Романов, Ш.З.Сайфулин, Ю.И.Тихомиров

МНОГОКАНАЛЬНАЯ
АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ
ПОКАЗАТЕЛЯ НЕОДНОРОДНОСТИ
МАГНИТНОГО ПОЛЯ СИНХРОФАЗОТРОНА
НА ЛИНИИ С ЭВМ ЕС-1010

Направлено в ПТЭ

1980

Одной из задач, входящих в программу совершенствования синхрофазотрона ОИЯИ, является повышение интенсивности ускоренных пучков. В работах /1,2/ отмечалось, что в этой связи важное значение имеет детальное знание топографии магнитного поля во всей рабочей области кольца ускорителя с целью осуществления оптимальных коррекций показателя неоднородности поля "n". Наряду с этим в условиях весьма вероятного возникновения заранее не предусматриваемых искажений магнитного поля вследствие регулярно проводимых работ в камере ускорителя имеет место задача периодического контроля "n" во всей рабочей области кольца /или по крайней мере на тех участках, где велись работы/.

Радиальное и азимутальное распределение "n" и производных $\frac{\partial n}{\partial r}$, $\frac{\partial^2 n}{\partial r^2}$ и их азимутальных гармоник на средних и больших индукциях необходимо также для повышения эффективности вывода пучков из камеры ускорителя.

Проведение магнитных измерений на синхрофазотроне связано с пребыванием людей в радиационно опасной зоне и магнитном поле и требует значительных энергозатрат на возбуждение магнита.

Вследствие этого выполнить требуемый объем измерений, а тем более производить периодический контроль "n" по полной программе без наличия автоматизированной системы, существенно уменьшающей, если не исключающей вовсе, присутствие обслуживающего персонала в опасной зоне и сокращающей общее время измерений, практически не представляется целесообразным.

В настоящее время создана и испытана в рабочих условиях автоматизированная десятиканальная система измерения "n", работающая на линии с ЭВМ ЕС-1010, позволяющая эффективно решить поставленную задачу.

Помимо задачи автоматизации и повышения оперативности измерений были решены методические вопросы, связанные с достижением высокой точности измерений, разработаны и изготовлены прецизионная электронная аппаратура, преобразователи величины градиента магнитного поля в электрический сигнал, обладающие высокой избирательностью, устройство для их контроля и калибровки и механические приспособления.

1. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Отличительной особенностью магнитного поля /МП/ синхροфазотрона является небольшая величина квадрупольной компоненты, определяющей рабочий градиент МП. При значении индукции МП, соответствующем моменту инъекции $/2,3 \cdot 10^{-2} \text{ Т}/$, градиент МП составляет $5,35 \cdot 10^{-4} \text{ Т/м}$.

Если градиент определять на основании измерений абсолютной величины индукции несколькими датчиками /например, десятью/, равномерно отстоящими друг от друга в рабочей области МП синхροфазотрона $/120 \text{ см}/$, то нетрудно убедиться в том, что идентичность коэффициентов преобразования датчиков и коэффициентов передачи в каналах усиления должна быть не хуже $1,4 \cdot 10^{-5}$ для определения "h" с точностью 0,5%. Из известных магнитометров такую точность абсолютных измерений обеспечивают лишь ЯМР магнитометры, которые в нашем случае непригодны. Градиентометры с применением датчиков Холла обладают недостаточной разрешающей способностью $/10^{-2} \text{ Т/м}^3$, в нашем случае требуется разрешение примерно в 10^3 раз лучше/.

Наиболее приемлемым является использование в качестве преобразователей индукционных катушек⁴, которые широко применяются при изучении двумерных магнитных полей методом гармонического анализа. При этом две плоские неподвижно закрепленные катушки, включенные встречно с целью компенсации чувствительности к дипольной составляющей, не обеспечивают требуемой точности измерений градиента ввиду того, что такая система будет обладать чувствительностью ко всем четным гармоникам, поэтому выделение второй гармоники требует поворота катушек вокруг продольной оси и последующего гармонического анализа.

Таким образом, для измерения градиента МП на синхροфазотроне с указанной точностью необходим индукционный преобразователь, обладающий высокой чувствительностью и избирательностью ко второй гармонике /ослабление дипольной составляющей должно быть не хуже 100 дБ/.

2. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ

Кроме того, что преобразователь для многоканальной измерительной системы должен удовлетворять вышеуказанному условию, он должен также быть небольших размеров, технологичен в изготовлении и обладать стабильными характеристиками. Таким требованиям в значительной степени соответствует избирательный индукционный преобразователь, представляющий собой четыре клиновидные секции, жестко закрепленные на цилиндрическом каркасе, рис. 1^{б/}, на поверхности которых нанесены витки обмотки, образующие контуры, описываемые гармоническим законом.

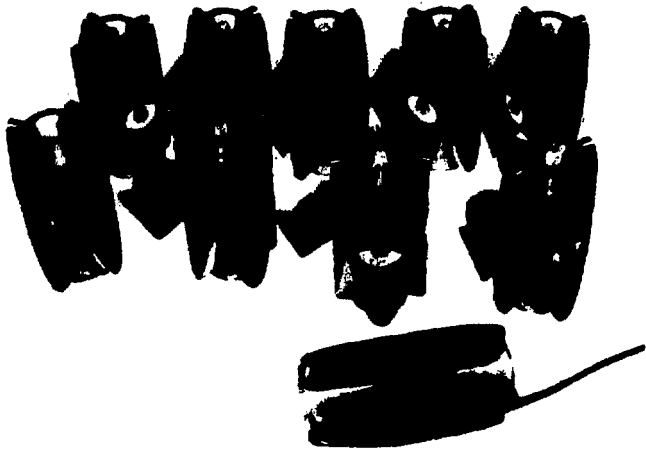


Рис. 1. Квадрупольные индукционные преобразователи.

При намотке витков всех секций в одном направлении начало обмотки одной секции соединяют с началом обмотки соседней, а конец - с концом второй соседней секции. Благодаря такой конструкции в измерительной катушке нет пересечения витков обмотки, гармоническая плотность намотки заменена гармоническим профилем витка, который воспроизводится с высокой точностью, а сами клиновидные секции имеют хорошую идентичность, т.к. изготавливались методом литья специального эпоксидного компаунда в одной и той же форме. Хорошей идентичности способствовало и то обстоятельство, что витки хорошо соприкасались с поверхностью клиновидных секций, на которую они укладывались.

Данные измерения чувствительности к гармоникам по 6-ю включительно приведены в таблице, где $\tau = R \cdot C$ - постоянная времени в цепи обратной связи интегратора.

В этих экспериментах использована мультиполярная магнитная мера /ММ/, которая создавала "чистые" гармоники МП с известными амплитудами и фазами^{/8/}, и дипольная магнитная мера /ДММ/, создающая высокооднородное МП^{/7/}.

Определение абсолютной величины чувствительности к градиенту производилось с точностью $2 \cdot 10^{-3}$, относительной - с точностью $5 \cdot 10^{-4}$. Абсолютная величина чувствительности оказалась равной $0,185 \tau^{-1} \text{ В} \cdot \text{с} \cdot \text{T}^{-1} \text{ м}$.

Таблица

Номер гармоник	Чувствительность преобразователя*	Единица измерений
1	$3,2 \cdot 10^{-4} \text{ r}^{-1}$	В с Т ⁻¹
2	$4,5 \text{ r}^{-1}$	-"-
3	0	
4	0	
5	0	
6	$4,9 \cdot 10^{-2} \text{ r}^{-1}$	-"-

* Усредненный результат измерений, выполненных для 10 преобразователей.

Конструкция преобразователя обеспечила подавление его чувствительности к первой гармонике на 80 дБ. Дальнейшее ослабление чувствительности к первой гармонике до 90÷95 дБ было достигнуто с помощью корректирующих витков, находящихся внутри преобразователя. Окончательная компенсация дипольной компоненты МП производилась с помощью небольших по площади рамок / $v \approx 1,5 \text{ см}^2$ /, находящихся с внешней стороны блока преобразователей /БП/, перед началом измерений, когда БП находился в МП синхрофазотрона.

3. ПОДВИЖНАЯ ПЛАТФОРМА

Блок преобразователей устанавливается на подвижной платформе, обеспечивающей его перемещение внутри камеры ускорителя по дуге окружности радиусом 28 м.

Основанием конструкции платформы служит лист из оргстекла размера 1800х350х20 мм. Платформа тремя колесами опирается на рельсы, расположенные вне рабочей области. /Расстояние между рельсами - 1700 мм/. Для устойчивого движения по криволинейной траектории платформа снабжена 4 ребордными колесами. Прогиб основания платформы при рабочей нагрузке на нее /12 кг/ устранен введением дополнительной арматуры в виде металлических струн с регулируемым натяжением. На платформе размещены также концевой выключатель, срабатывающий через 1 см продольного /азимутального/ перемещения платформы, и специальный кабельный 86-контактный разъем. В движение платформа приводится двигателем с редуктором УР-10, который вместе с направляющими роликами смонтирован на плите и стойках. Узел, приводящий в движение платформу, крепится в конце квадранта. Устройство, передающее движение платформе, представляет собой верньерный механизм, состоящий из немагнитного металлического тросика диаметром 2,1 мм и направляющих роликов. Кинематическая схема этого устройства приведена на рис.2.

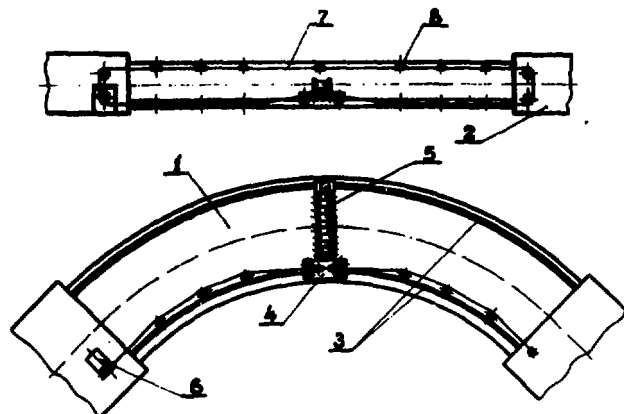


Рис. 2. Кинематическая схема привода подвижной платформы. 1 - камера ускорителя, 2 - прямолинейный промежуток, 3 - рельсы, 4 - платформа, 5 - блок преобразователей, 6 - двигатель, 7 - тросик, 8 - направляющие ролики.

Блок преобразователей, состоящий из 10 квадрупольных датчиков и датчика, чувствительного к абсолютной величине магнитного поля, установлен на платформе в фиксирующих устройствах. С целью получения при необходимости большего числа точек измерения по радиусу и в особенности для контроля идентичности всех каналов перед началом измерений предусмотрена возможность сдвига БП как целого в радиальном направлении на +5 см от центрального положения.

БП соединен с электронной аппаратурой 80-метровым кабелем, представляющим собой набор скрученных пар проводов, находящихся в экране. Общий вид платформы с блоком датчиков показан на рис. 3. На заднем плане виден соединительный кабель, металлический тросик и узел крепления двигателя.

4. ЭЛЕКТРОННАЯ АППАРАТУРА

Каждый из 10 каналов измерения градиента /рис. 4/ включает предусилитель /ПУС/ с автономным источником питания /ИП/, имеющим гальваническую развязку от "земли", программно-управляемый аттенюатор /М/, управляемый интегратор /И/ и оконечный усилитель /ОУ/ с фильтром низких частот /ФНЧ/.

Сигнал с квадрупольного датчика /1,5 мВ/ посредством экранированной скрученной пары длиной 80 м поступает в собранный на базе прецизионного операционного усилителя по схеме симметричного УПТ предусилитель, имеющий следующие характеристики:

- а/ коэффициент подавления синфазной наводки - 90 дБ,
- б/ шумы в полосе частот 0,01...10 Гц - 1 мкВ,
- в/ температурный дрейф выходного напряжения - 3 мкВ/ К,
- г/ коэффициент усиления - 45.

С выхода ПУС сигнал также посредством экранированной скрученной пары /но длиной 300 метров/ передается в зал управления синхрофазотроном, где расположена основная часть аппаратуры, для последующей обработки. Интегратор собран на базе высокоточных УПТ типа УВТ-8-70 и имеет два режима работы: интегрирование входного сигнала и хранение его величины по окончании процесса интегрирования.

Схема интегратора аналогична используемой в индукционном магнитометре^{8/}. Оконечный усилитель и ФНЧ уменьшают до 1 мВ высокочастотные наводки, возникающие на выходе УВТ-8-70, собранного по схеме модуляции и демодуляции входного сигнала. Блок управления режимом работы интеграторов / В-таймер/, на вход которого поступает сигнал с датчика абсолютной величины поля, определяет абсолютную величину МП и вырабатывает команды на изменение коэффициента передачи интегратора, а также управляет режимом работы последнего. Таким образом реализуется возможность измерять величину "п" в полном динамическом диапазоне рабочих индукций синхрофазотрона /2,3·10⁻² ... 1,2/Т автоматически.

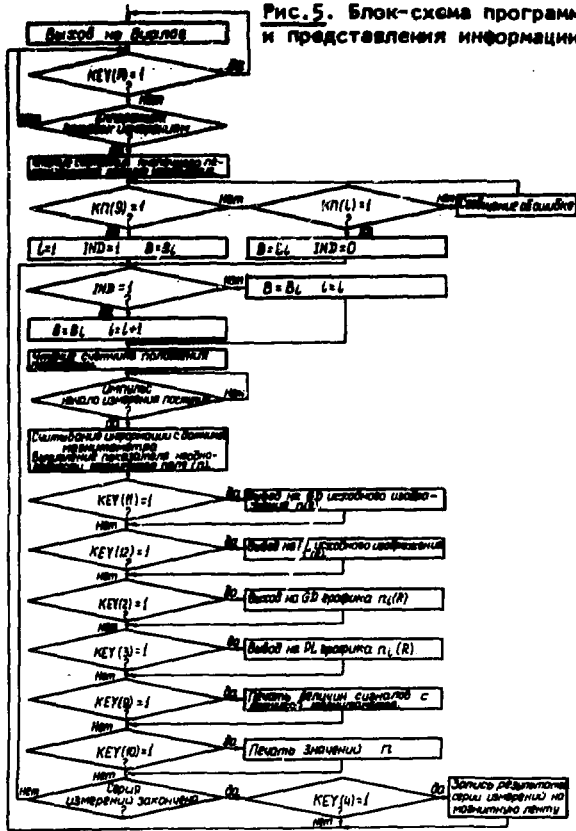
В комплект электронной аппаратуры также входит блок питания двигателя платформы /ПД/ и расположенный вблизи ЭВМ пульт управления, включающий в себя блок задания временных режимов измерений /ВРИ/, блок управления движением платформы /ПУД/, блок цифровой индикации азимутального положения платформы /ИПД/ и переговорное устройство громкой связи /ГС/.

5. АППАРАТУРА СОПРЯЖЕНИЯ С ЭВМ

Аппаратура сопряжения измерительной и управляющей электроники с ЭВМ выполнена в стандарте КАМАК и через разработанный в Лаборатории высоких энергий универсальный драйвер ветви /УДВ/^{9/} подключена к ЭВМ ЕС-1010, связанной по программному каналу с ЭВМ ВТ-1010Б^{10/}.

Сигналы с ОУ поступают на входы линейных приемников-усилителей^{11/}, с выхода которых через аналоговый мультиплексор подаются на вход импульсного 12-разрядного аналого-циф-

Рис. 5. Блок-схема программы приема и представления информации.



рового преобразователя /АЦП/. Для фиксации синхронизирующих импульсов /импульс готовности системы к очередному циклу измерения и начала измерения/, а также для связи пульта управления режимами работы системы с ЭВМ используются параллельные входные регистры /ПВР/. В системе предусмотрено девять режимов работы, задаваемых кнопочным переключателем пульта управления. Основным рабочим режимом является проведение циклов измерения при последовательно увеличивающихся значениях магнитного поля синхрофазотрона: 0,023; 0,06; 0,15; 0,3; 0,5; 0,75; 1,0 и 1,2 Т. Остальные восемь режимов соответствуют измерениям при одном из перечисленных значений поля.

Для определения азимутального положения платформы сигнал с концевого выключателя поступает на входы двоичных счетчиков СЧ /СЧ416/ ¹²/.

6. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Программное обеспечение системы включает подпрограммы приема, обработки и вывода информации на устройства представления информации и накопители на магнитной ленте, написанные на языке АССЕМБЛЕР ЭВМ ЕС-1010. После загрузки программы в оперативную память ЭВМ и ее запуска происходит выход в режим диалога /рис.5/, в котором задаются номер квадранта ускорителя, радиальное положение платформы и параметры для записи на магнитную ленту, необходимые при дальнейшей обработке записанной информации в режиме он-лайн. По завершении диалога управление передается подпрограмме измерения, которая начинает свою работу с ожидания синхронизирующего импульса готовности аппаратуры. После поступления импульса готовности считывается состояние кнопочного переключателя, и в соответствии с ним из рабочих таблиц подпрограммы выбирается значение МП, при котором проводится измерение, определяется азимутальное положение платформы и подпрограмма переходит в ожидание импульса "Начало измерения". При поступлении на ПВР этого импульса информация с датчиков магнитометра считывается в память ЭВМ и на ее основе вычисляется величина показателя неоднородности магнитного поля. После завершения обработки данных происходит возврат в основную программу. Результаты каждого измерения, соответствующие определенному значению магнитного поля, можно вывести на устройства представления информации, для выбора которых используется инженерный пульт управления ЭВМ ЕС-1010. На печать выводятся полученные величины сигналов с десяти датчиков магнитометра, вычисленные на соответствующих радиусах апертуры ускорителя значения "п" и величина магнитного поля.

Графический дисплей ГД-71 и графопостроитель НР-7210А используются для наглядного представления зависимостей $\nu=f(r)$.

При этом на графический дисплей можно вывести все графики, соответствующие одной серии измерений /8 графиков/. В начале новой серии информация, полученная в предыдущей, стирается. По завершении серии измерений результаты могут быть записаны на магнитную ленту.

В качестве примера на рис.6 приведены зависимости $\nu=f(r)$, измеренные для 8 значений магнитной индукции в центре полюса. Рис.7 иллюстрирует влияние токов коррекции ¹³/ на величину "п" при величине индукции 0,023 Т.

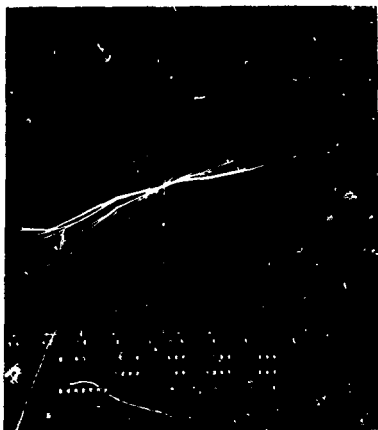


Рис. 6. Зависимости $n=f(r)$ при 8 значениях магнитного поля.

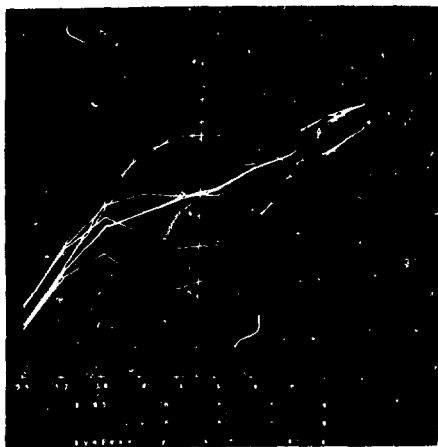


Рис. 7. Зависимости $n=f(r)$ для $B_1 = 2,3 \cdot 10^{-2}$ Т при различных значениях токов коррекции.

Фотографии получены с экрана графического дисплея ГД-71. С помощью данной системы были найдены 16000 значений "n" при 8 значениях магнитной индукции. Время измерений составило ~20 часов.

Погрешность измерения, определяемая суммой слагаемых отдельных погрешностей /степенью компенсации первой гармоники, дрейфом "нуля" измерительного канала, наводками промышленной частоты/, не превышала 1% для индукции 0,023 Т и 0,5% для индукции выше 0,06 Т.

Проведенные испытания системы в реальных условиях показали возможность ее использования для оперативного измерения в слабифокусирующих ускорителях.

В заключение авторы выражают благодарность И.Н.Семенову за стимулирование данной работы и полезные обсуждения, В.Н.Кузнецову, А.А.Анашину, П.Н.Буйлову за изготовление аппаратуры и участие в наладке системы, всем сотрудникам отдела синхрофазотрона, принимавшим участие в проведении измерений, а также В.П.Пугачевичу за консультации при изготовлении элементов преобразователей посредством литья эпоксидного компаунда.

ЛИТЕРАТУРА

1. Безногих Ю.Д. и др. В кн.: Труды V Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, т.2. "Наука", М., 1977, с.245.
2. Безногих Ю.Д. и др. В кн.: Труды VI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, т.2, ОИЯИ, Дубна, 1979, с.136.
3. Лачинов В.М. и др. ОИЯИ, Р9-12442, Дубна, 1979.
4. Воеводин М.А., Коваленко А.Д. ОИЯИ, Р9-12378, Дубна, 1979.
5. Воеводин М.А. Авт.свид. СССР №631848, кл. G01232/02, Бюлл.ОИПОТЗ, 1978, №41, с.170.
6. Воеводин М.А. и др. ОИЯИ, Р9-12687, Дубна, 1979.
7. Воеводин М.А. и др. ОИЯИ, Р13-12897, Дубна, 1979.
8. Воеводин М.А. и др. ОИЯИ, 13-11855, Дубна, 1978.
9. Нгуен Фук и др. ОИЯИ, 10-8712, Дубна, 1975.
10. Chernykh E.V. IEEE Trans.Nucl.Sci., 1977, v.NS-24, No.6, p.2561.
11. Силаев Е.А. ОИЯИ, 13-10956, Дубна, 1977.
12. Нгуен Фук и др. ПТЗ, 1975, №4, с.242.
13. Воеводин М.А. и др. ОИЯИ, 9-9625, Дубна, 1976.

Рукопись поступила в издательский отдел
20 августа 1980 года.