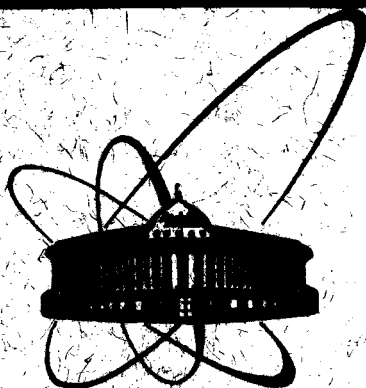


Р9-РФВ



СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА

B 63

Р9-89-846

М.А. Воеводин, В.М. Дробин, Н.А. Коруков,  
Ш.З. Сайфулин, И.Н. Яловой

ФЕРРОЗОНДОВЫЙ МАГНИТОМЕТР

1989

Феррозондовый магнитометр предназначен для исследования топографии остаточного магнитного поля в диполях нуклотрона. Он также может быть использован для измерения слабых рассеянных магнитных полей, магнитного поля Земли, изучения топографии напряженности магнитного поля вблизи ферромагнитных тел, изучения магнитного поля внутри магнитных экранов.

Феррозондовые магнитометры являются разновидностью ферроиндукционных, т.к. в них используются индукционные преобразователи активного типа.

Происходящие в них процессы связаны с наличием по меньшей мере двух магнитных полей: измеряемого /постоянного или медленноменяющегося поля ( $H_0$ )/ и вспомогательного переменного поля, создаваемого обмоткой возбуждения ( $H_B$ ). Режим работы феррозондового преобразователя характеризуется величиной поля возбуждения. В большинстве случаев используют режим, при котором амплитуда поля возбуждения достаточно велика, и перемагничивание сердечника происходит по предельной петле гистерезиса, что обеспечивает такие преимущества, как полная восстанавливаемость после кратковременного наложения постоянного поля и однозначность преобразования, т.е. высокая устойчивость "нуля" /1/.

Наиболее известной и хорошо освоенной разновидностью преобразователя рассматриваемого типа является феррозонд, состоящий из двух тонких стержневых сердечников с высокой магнитной проницаемостью, помещенных внутрь соленоидов.

Для продольного способа возбуждения, при котором  $H_0 \parallel H_B$ , выходное напряжение с феррозонда составит

$$e(t) = -2w_c \cdot S \cdot \mu_0 H_0 \cos \beta \frac{d\mu_D^*}{dt} \quad , \quad /1/$$

где  $w_c, S$  - число витков сигнальной обмотки и площадь поперечного сечения магнитных стержней;  $\beta$  - угол между продольной осью стержневого преобразователя и вектором измеряемого магнитного поля;  $\mu_D^* = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{dB}{dH}$  - относительная величина дифференциальной магнитной проницаемости стержневого преобразователя. Поскольку  $\mu_D^*$  - четная функция, то на выходе сигнальной обмотки напряжение будет состоять только из четных гармоник.

Магнитная индукция в теле продольных стержней В с измеряемой величиной  $H_0$  связана следующим соотношением:

$$B = \mu_0 \mu^* H_0,$$

где

$$\mu^* = \frac{\mu}{1+N(\mu-1)}$$

/2/

- магнитная проницаемость тела стержневого преобразователя,  $N$  - коэффициент размагничивания стержня. Формула /2/ аналогична выражению для коэффициента передачи усилительного устройства с отрицательной обратной связью. Глубина обратной связи определяется произведением  $\mu N$ . При  $\mu N \gg 1$  обратная связь становится настолько глубокой, что изменение проницаемости вещества преобразователя  $\mu$ , например, из-за изменения температуры, практически не изменяет магнитной проницаемости тела стержневого преобразователя. Это положительное свойство феррозондов с разомкнутыми сердечниками позволяет использовать их в широком диапазоне температур.

### ОПИСАНИЕ ПРИБОРА

Феррозонд описываемого прибора состоит из 2-х пермалловых стержней марки 79НМ длиной 10 мм и диаметром 0,2 мм. Каждый стержень помещен внутри соленоида, длина которого равна длине стержня. Число витков в соленоиде - 650, диаметр намоточного провода - 0,08 мм. Магнитная проницаемость тела стержневого преобразователя - 700. Размеры феррозонда 3x1x12 мм. Феррозонд помещен в контейнер из немагнитного материала размерами 30x16x13 мм. Прибор снабжен двумя феррозондами, один из которых чувствителен к продольной, а второй к поперечной компоненте магнитного поля.

Возбуждение преобразователя осуществляется генератором Г /рис.1/. Оптимальная частота возбуждения составляет 25 кГц. Как показывает опыт эксплуатации прибора, более стабильная и надежная работа магнитометра достигается при использовании задающего генератора, стабилизированного кварцем /M1-1, M1-2 на рис.2//2/. Выход генератора соединен буфером M1-3 с делителем частоты M2 (K555TM2). Через буферы M3.1 и M3.2 (K155ЛН3) напряжение прямо-

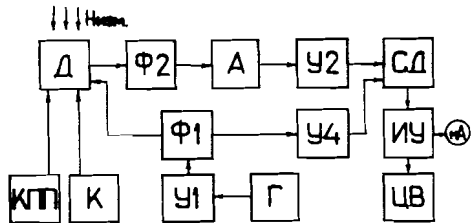


Рис.1. Структурная схема магнитометра.

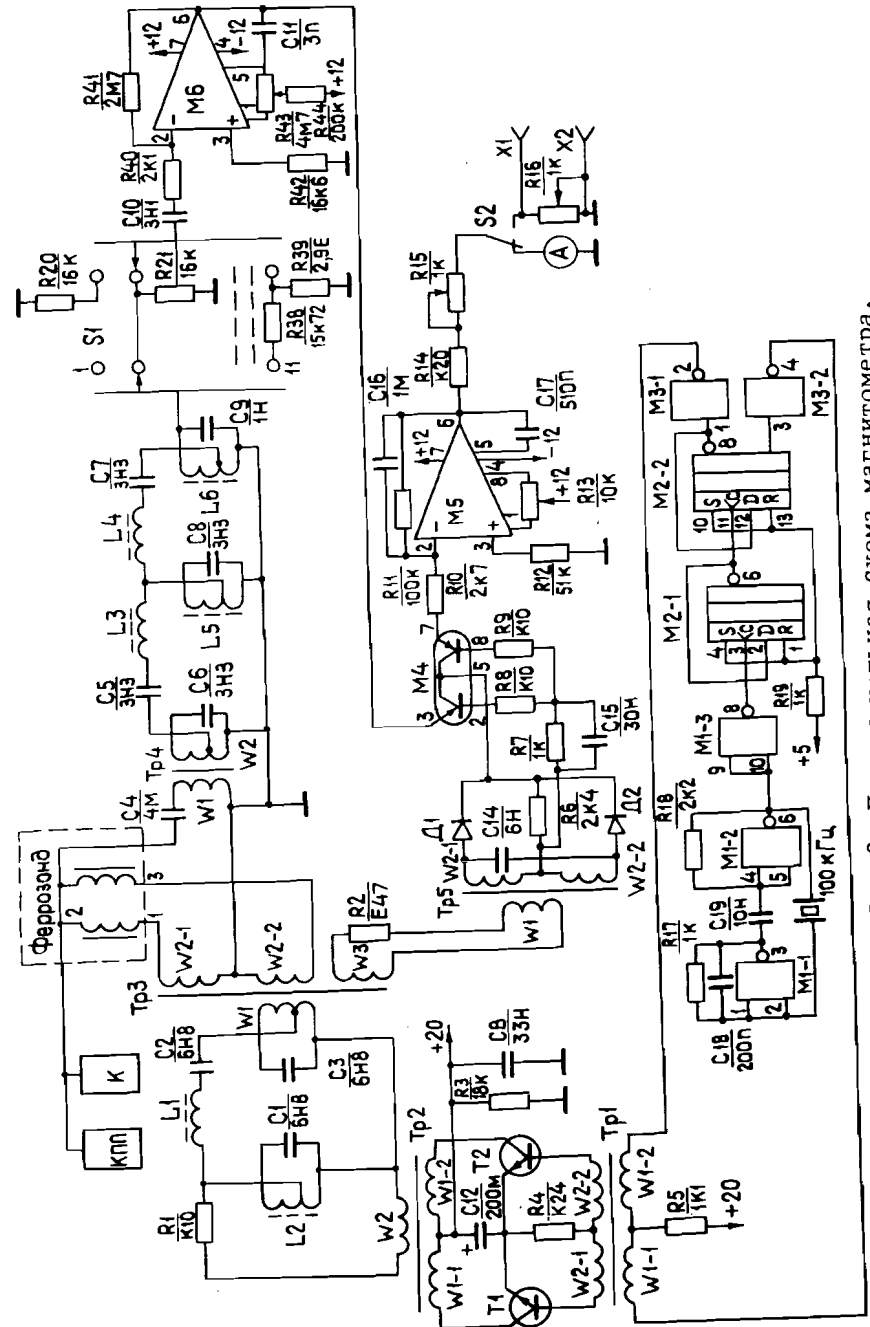


Рис.2. Принципиальная схема магнитометра.

угольной формы поступает на входной трансформатор Тр1 усилителя мощности (У1), собранного на транзисторах КТ817. Выходное напряжение с усилителя мощности подается на 2-звенный полосовой фильтр Ф1 (L1, L2, C1 ... C3, Тр3), преобразующий прямоугольные импульсы в синусоидальное напряжение основной части возбуждения феррозонда 25 кГц. Напряжение 2-й гармоники, пропорциональное измеряемому магнитному полю, снимается с диагонали моста, состоящего из вторичных обмоток Тр3 и двух обмоток возбуждения феррозонда. При такой схеме включения ослабление величины первой гармоники составляет ~40 дБ. Дальнейшее уменьшение напряжения первой гармоники достигается 3-звенным полосовым фильтром Ф2 (Тр4, L3 ... L6, C6 ... C9). Общее ослабление первой гармоники достигает 80 дБ.

Для обеспечения режима работы прибора в широком диапазоне магнитных полей ~85 дБ предусмотрено использование усилителя М6(У2) и аттенюатора S1(A). Аттенюатор обеспечивает постоянную нагрузку /16 кОм/ на выходе фильтра на всех 11 диапазонах измерения магнитного поля. Усилитель с коэффициентом усиления 1000 в рабочей полосе частот /20 ... 100/ кГц собран на базе быстродействующего операционного усилителя К574УД1. С выхода усилителя сигнал 2-й гармоники поступает на синхронный детектор СД (М4 К124КТ1), управление которым осуществляется схемой У4 (Тр5, Д1, Д2, R6, С14). Интегрирующий усилитель ИУ(М5) должен обладать небольшим дрейфом выходного напряжения и малым уровнем собственных шумов. Этим требованиям удовлетворяет схема с операционным усилителем AD504<sup>1/3</sup>. Выходное напряжение ИУ измеряется встроенным стрелочным вольтметром. Предусмотрена также возможность подключения внешних измерителей постоянного или медленноменяющегося напряжения.

Для измерения сверхмалых магнитных полей /5·10<sup>-8</sup> ... 1·10<sup>-5</sup> Тл/предусмотрен режим внутренней калибровки магнитометра /К/. Калибровка осуществляется при помещении феррозонда внутрь вспомогательного соленоида и 3-слойного магнитного экрана из пермаллоя, обладающего коэффициентом ослабления магнитного поля Земли - 80 дБ.

Общий вид магнитометра представлен на рис.3.

Технические характеристики магнитометра

- |  |  |
|--|--|
| 1. Диапазон измеряемых магнитных полей   | 5·10 <sup>-8</sup> ÷ 1·10 <sup>-3</sup> Тл |
| 2. Порог чувствительности                | 2,5·10 <sup>-9</sup> Тл                    |
| 3. Амплитуда тока возбуждения феррозонда | 100 мА                                     |
| 4. Погрешность измерения                 | ±2%  |

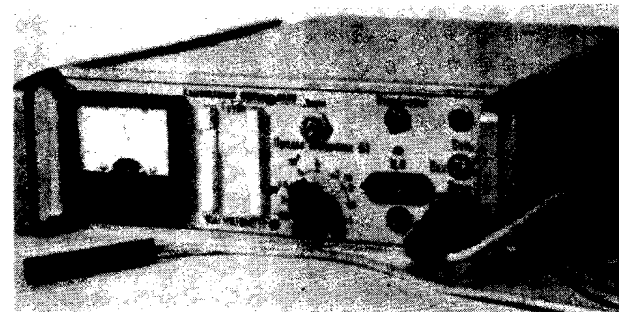


Рис.3. Общий вид магнитометра.

#### 5. Геометрические размеры:

феррозонда	3x1x12 мм
контейнера феррозонда	30x16x13 мм
прибора	360x240x80 мм

Отличительными особенностями магнитометра являются:

а/ отсутствие измерительной обмотки в феррозонде, что упрощает изготовление датчика;

б/ использование кварцевого генератора в качестве задающего основной гармоники и пассивных 2-звенных фильтров, собранных из термостабильных элементов, повышает надежность работы прибора и увеличивает точность измерения;

в/ небольшие габариты прибора, использование в нем высококачественных операционных усилителей уменьшают дрейф выходного напряжения, шумы и расширяют динамический диапазон;

г/ относительная простота структурной схемы прибора способствует, в случае необходимости, его мелкосерийному производству.

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Магнитометр использовался для исследования распределения вертикальной компоненты магнитного поля диполей нуклотрона. Актуальность этой задачи определяется необходимостью создания магнитной системы синхротрона, которая удовлетворяла бы высоким требованиям, предъявляемым к однородности магнитного поля и идентичности эффективной магнитной длины диполя.

На рис.4, 5, 6 представлены экспериментальные результаты исследования распределения остаточного магнитного поля в диполях нуклотрона для случая, когда ток возбуждения диполя состав-

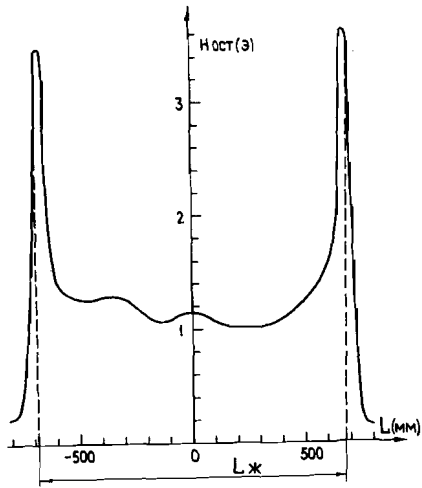


Рис.4. Азимутальное распределение остаточного магнитного поля в диполе без размагничивания.

Рис.5. Радиальное распределение магнитного поля при 3-х значениях азимута в диполе без тока размагничивания.

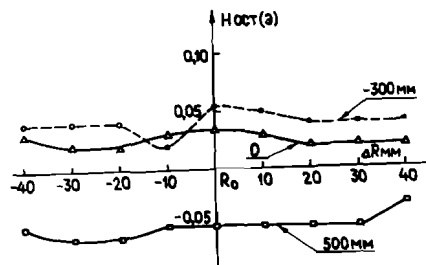
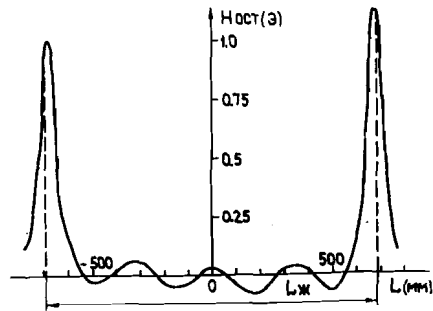
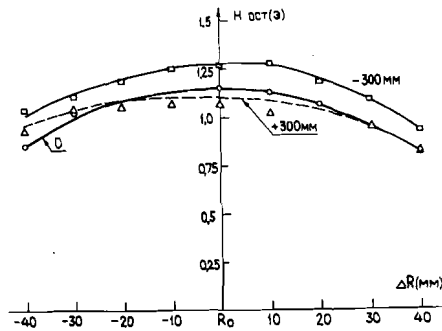


Рис.6. Азимутальное /верхний рис./ и радиальное распределение остаточного МП в диполе при токе размагничивания 650 А.

лял 6,5 кА. Представленные результаты свидетельствуют о существенном уменьшении интегральной величины остаточного магнитного поля и квадратичной нелинейности МП в рабочей апертуре диполя в режиме перемагничивания. При этом оптимальная величина тока размагничивания составляет 650 А.

В заключение авторы выражают благодарность механикам А.А.Анашину и В.Н.Кузнецову за монтаж электронных узлов магнитометра, а также П.И.Никитаеву и И.В.Кузнецову за обеспечение режима перемагничивания диполя. Особую благодарность авторы выражают сотрудникам Института физики металлов АН СССР /г.Свердловск/ М.А.Веденеву, В.И.Дрожжиной и В.А.Куликову за предоставленные материалы/4/ и полезные консультации при разработке одного из вариантов магнитометра.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Афанасьев Ю.В. Феррозондовые приборы. Л.: Энергоатомиздат, 1986.
2. Куценко А.В. и др. - ПТЭ, № 4, 1973, с.16.
3. ANALOG DEVICES, Data-Acquisition Data book, 1982, v.1, INTEGRATED CIRCUITS, p.p. 4-31÷4-38.
4. Веденев М.А., Дрожжина В.И., Фридман Л.Х. - В сб.: Труды ИФМ АН СССР, вып.24, Свердловск: Изд.ИФМ АН СССР, 1985.

Рукопись поступила в издательский отдел  
21 декабря 1989 года.