

ин. экс 3624

ԵՐԵՎԱՆԻ ՖԻԶԻԿԱՅԻ ԻՆՍՏԻՏՈՒՏ
ЕРЕВАНСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

ЕФИ-457(64)-80

В.С.УРИХАНЫ

МАГНИТОМЕТР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ИНТЕГРАЛА
МАГНИТНОГО ПОЛЯ ВИГГЛЕР-МАГНИТА

ԵՐԵՎԱՆ 1981 ԵՐԵՎԱՆ

ФИ-457(64)-80

V.S.URIKHANIAN

THE MAGNETOMETER FOR MEASURING THE MAGNETIC FIELD
INTEGRAL OF WIGGLER-MAGNET

A highly sensitive magnetometer is developed on the basis of transformation into proportional electric signal of Ampere ponderomotive force which arises when placing the current-carrier conductor of constant current in magnetic field. Semiconductor piezoresistive converters are used as force sensors. The magnetometer voltage sensitivity of magnetic field integral is no less than $2.45 \cdot 10^3$ V/Tm, the threshold sensitivity is no more than $4 \cdot 10^{-6}$ Tm. The working length of the magnetometer is 600 mm and the cross section of the current-carrying conductor is 0.8 mm. The magnetometer working current through the current-carrying conductor is 2.5 A, and the maximum output signal is 2 V. The magnetometer can be used for measuring the magnetic field integral in narrow gaps of periodical magnetic structures in elementary particle acceleration technique.

Yerevan Physics Institute
Yerevan 1981

ЕРЕВАНСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

ФИ-457(64)-80

В.С.УРИХАНИАН

МАГНИТОМЕТР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ИНТЕГРАЛА
МАГНИТНОГО ПОЛЯ ВИГГЛЕР-МАГНИТА

Ереван 1981

На Ереванском ускорителе установлен вигглер-магнит с максимальным значением постоянной во времени индукцией магнитного поля 1,8 Т. Его рабочая длина составляет 560 мм, а высота и ширина зазора между полюсами соответственно равны 20 мм и 40 мм

На рис. I приведено распределение магнитной индукции поля вигглер-магнита в вертикальной плоскости, аппроксимированного как полусинусоиды в трех равных участках по его длине. Максимальный односторонний интеграл магнитного поля составляет 0,23 Тм.

Вносимое вигглер-магнитом интегральное возмущение на равновесную орбиту электронного пучка во время инжекции (при энергии 50 МэВ) должно удовлетворять условию [1]

$$\left| \int_{\ell} B(\ell) d\ell \right| \leq 10^{-5} \text{ Тм} \quad (1)$$

где $B(\ell)$ - магнитная индукция поля;
 ℓ - длина вигглер-магнита.

Из условия (1) следует, что порог чувствительности магнитометра, предназначенного для измерения интеграла магнитного поля вигглер-магнита должен быть меньше чем $\pm 10^{-5}$ Тм. Этой величине соответствует $4,5 \cdot 10^{-8}\%$ от значения максимального одностороннего интеграла.

Из-за неточности изготовления и сборки отдельных узлов вигглер-магнита интеграл магнитного поля может иметь недокомпенсацию порядка $\pm 10\%$ от расчетного значения одностороннего ин-

теграла магнитного поля и при максимальном значении индукции поля может составлять около $\pm 0,028$ Тм. Следовательно, динамический коэффициент магнитометра должен быть не хуже, чем $5 \cdot 10^3$.

В ускорительной технике для измерения величин интегралов магнитных полей часто используются индукционные катушки, пермаллоевые датчики, датчики на основе электронного парамагнитного резонанса (ЭПР), датчики Холла, датчики на основе ядерного магнитного резонанса (ЯМР) [1-3]. Измерение интеграла магнитного поля с помощью перечисленных датчиков производится дискретно. Они из-за недостаточного порога чувствительности и больших погрешностей мало пригодны для вигглер-магнита. Надо отметить, что их большие габариты не могут обеспечить также изучение топографии интеграла поля вигглер-магнита для удовлетворения условия (I) в зонах прохождения пучка. И, наконец, съем и обработка информации при дискретных измерениях трудоемки и требуют сложной и дорогостоящей аппаратуры.

В последние годы большое признание получило измерение трасс заряженных частиц методом гибкой проволоки с током [4,5]

Метод пригоден для измерения интеграла магнитных полей, однако не обеспечивает требуемого порога чувствительности для вигглер-магнита.

Для измерения интеграла магнитного поля неоднородных магнитных структур наиболее перспективным являются магнитометры, принцип работы которых основан на регистрации пьезомоторных сил, возникающих при взаимодействии магнитного поля с токонесущим проводником и, связанных с интегралом поля известными соотношениями. Величина порога чувствитель-

ности таких магнитометров, в основном, определяется чувствительностью механоэлектрических преобразователей и величиной тока в токонесущем проводнике.

В работе [6] описан такой магнитометр предназначенный для измерения интеграла магнитного поля. Он представляет собой токонесущую медную проволоку диаметром 5 мм и длиной 2,5 м, которая натянута силой порядка 1000 Н и помещена в трубку с поперечными размерами 40x40 мм. Трубка соединена с двумя пьезодатчиками, которые преобразуют возникшую силу Ампера в пропорциональный электрический сигнал. Проволока питается низкочастотным током величиной 70 А. Порог чувствительности магнитометра равен $2,5 \cdot 10^{-4}$ Тм, а динамический коэффициент составляет около $2 \cdot 10^3$ (максимальное значение одностороннего интеграла равно 0,45 Тм).

Если указанный магнитометр в 2,5 раза не удовлетворяет требованию вигглер-магнита по динамическому коэффициенту, то по порогу чувствительности - хуже в 25 раз. Его габариты в 2 раза больше, чем зазор между полюсами вигглер-магнита. Существенным препятствием для его использования является также большой диаметр токонесущей проволоки (25% от величины зазора вигглер-магнита), который ограничивает точность пространственного изучения топографии интеграла поля и усложняет обработку результатов.

Ниже рассматривается магнитометр для измерения интеграла магнитного поля вигглер-магнита удовлетворяющий перечисленным требованиям. Этого добились, в основном, применением механоэлектрического преобразователя с высокой чувствительностью, уменьшением тока через проволоку, уменьшением натяжения и диаметра проволоки.

Схематическая конструкция магнитометра показана на рис.2. Медная проволока I диаметром 0,8 мм с помощью пружины 2 натя-

нута силой 150 Н между двумя опорами 3. На расстоянии 600 мм друг от друга (рабочая длина магнитометра) на основании 4 закреплены два полупроводниковых пьезодиодных механоэлектрических преобразователя 5, с которыми соединена проволока I. Направление $У$ является осью чувствительности магнитометра. Проволока I питается постоянным током, величина которого регулируется и может достигать 5А.

Когда магнитометр помещается в магнитное поле с величиной индукции $B(\ell)$ на проволоку I длиной ℓ и током I действует сила Ампера

$$F_y = I \int_{\ell} B(\ell)_z d\ell. \quad (2)$$

От этой силы F_y возникают реакции на опорах F_1 и F_2 :

$$F_y = F_1 + F_2, \quad (3)$$

которые преобразователями 5 преобразуются в пропорциональный электрический сигнал.

При чувствительности преобразователя по усилию λ_n , соответствующий суммарный выходной сигнал магнитометра будет

$$U_{\text{вых}} = \lambda_n F_y = \lambda_n (F_1 + F_2) = \lambda_n I \int_{\ell} B(\ell)_z d\ell, \quad (4)$$

а интеграл магнитного поля определяется как

$$\int_{\ell} B(\ell)_z d\ell = \frac{F_1 + F_2}{I} = \frac{U_{\text{вых}}}{\lambda_n I}. \quad (5)$$

Для измерения усилия F_1 и F_2 были изготовлены полупроводниковые пьезорезистивные преобразователи силы.

Выявим основные требования, которым должен удовлетворять механоэлектрический преобразователь магнитометра.

Допустимому значению интеграла магнитного поля из условия

(I) по (5) соответствует реакция на опорах

$$F_1 + F_2 = \pm I \cdot 10^{-5} \text{ Н}. \quad (6)$$

При величине тока в проволоке 5А усилие составляет $\pm 5 \cdot 10^{-5}$ Н. Следовательно, порог чувствительности каждого из механоэлектрических преобразователей в 2,5-кратном запасе должен быть не хуже 10^{-5} Н. Верхний предел измеряемого усилия при динамическом коэффициенте магнитометра $5 \cdot 10^3$ должен составлять $5 \cdot 10^{-2}$ Н.

На рис.3 приведен чертеж общего вида полупроводникового пьезорезистивного преобразователя силы, а на рис.4 показана фотография его внешнего вида и отдельных деталей. Он состоит из пьезодиода и прижимного устройства. Пьезодиод представляет собой пластинку II из монокристаллического германия ГЭС-3, припаянную на пружине 6, на которую давит индентор 5, изготовленный из металлокерамического твердого сплава ВК-10, с радиусом закругления кончика 30 мкм, который запрессован в корпусе 2. Принцип работы пьезодиода основан на изменении обратного тока через прижимной контакт от изменения усилия на него. Питание пьезодиода составляет 20-50 В, а величина сопротивления нагрузки последовательно соединенного с пьезодиодом, с которого снимается выходной сигнал 10 - 30 Ком. Прижимное устройство предназначено для создания первоначального нерабочего усилия в контакте пьезодиода. При этом не должно иметь место взаимное перемещение или перекос индентора и полупроводниковой пластинки. В противном случае пьезодиод может выйти из строя. Прижимное устройство состоит из пружин 6 и I2, которые через изолирующие пластинки I0 закреплены на корпусе 2 винтами 8. Связь между пружинами 6 и I2 осуществлена стеклянным шаром 9. Измеряемое рабо-

чее усилие подается на пружину I2 в зоне опирания шара 9.

Для использованных пьезодиодов, при величине нелинейных искажений $\pm 0,5\%$, рабочий диапазон усилия составляет порядка $\pm 0,002Н$ на уровне первоначального усилия $0,272Н$. При этом чувствительность пьезодиода по напряжению имеет величину не меньше $1000В/Н$. Уровень шумов составляет до $100 мкВ$.

Ввиду того, что полупроводниковый пьезодиодный преобразователь чувствителен также и к переменным усилиям (полоса пропускания порядка $0 - 1000 Гц$), калибровка магнитометра производилась на виброизолирующей платформе, которая уменьшила влияние производственных вибраций более чем в 20 раз. Шум при этом не превышал $\pm 5 мВ$.

Калибровка производилась по постоянному току через проволоку с помощью постоянного магнита с величиной индукции однородного магнитного поля $3,2 \cdot 10^{-2}Т$ и шириной полюсных наконечников 20 мм. Интеграл магнитного поля при этом равен $6,4 \cdot 10^{-4}Тм$. Магнит устанавливался на середине магнитометра так, чтобы проволока находилась в зазоре между его полюсными наконечниками. Выходной сигнал магнитометра для среза постоянного составляющего, снимался по схеме неуравновешенного моста, одним из плеч которого являлся преобразователь. Изменяя величину тока через проволоку, вольтметром измерялся выходной сигнал магнитометра.

График зависимости выходного сигнала магнитометра, снятого с одного из преобразователей (соответствует интегралу поля $3,2 \cdot 10^{-4}Тм$) от величины тока в проволоке приведен на рис.5. Как видно, до значений величины тока 5А линейность преобразования в пределах ошибки измерения, не превышающей $\pm 1\%$ сохраняется. По рис.5 и формуле (5) определяется чувствительность преобразователя λ_n , которая составляла $1200В/Н$. Чувствитель-

ность самого магнитометра зависит от величины тока в проволоке. График этой зависимости приведен на рис.6. Как видно, чувствительность магнитометра линейно зависит от тока в проволоке до величины 5А. При значениях тока больше 5А чувствительность магнитометра падает, что связано с насыщением преобразователя.

Если принять нижний предел выходного сигнала магнитометра порядка 25 мВ (в 5 раз превышающий уровень шумов), то требуемый порог чувствительности ($10^{-5}Тм$) обеспечивается при токе в проволоке 2А. Чувствительность магнитометра при этом составляет $2,45 \cdot 10^8В/Тм$. Порог чувствительности магнитометра, при токе в проволоке 5А будет $4 \cdot 10^{-6}Тм$. На рис.7 приведена зависимость предельных значений измеряемого магнитометром интеграла магнитного поля от величины тока в проволоке. Линии 1 соответствует порог чувствительности магнитометра на уровне 25 мВ, а линии 2 - верхний предел при максимальном выходном сигнале 2В. Как видно из рис.7 при двух значениях рабочего тока в проволоке ($3 \cdot 10^{-2}А$ и 2 А) перекрывается динамический диапазон магнитометра (линии 3,4). Для того, чтобы перекрыть весь динамический диапазон магнитометра при одном значении величины тока в проволоке, как видно из рис.7 (линия 5), необходимо уменьшить величину уровня шумов до значения 0,25 мВ.

Проверялась также зависимость суммы выходных сигналов преобразователей от расположения постоянного магнита по длине магнитометра. Измерения проводились в 9 точках. В пределах ошибки измерения сумма выходных сигналов оставалась постоянной и составляла 1,6В при токе в проволоке 2А.

Для измерения интеграла магнитного поля вигглер-магнита магнитометр помещается в зоне магнитного поля по длине интересующей линии, балансируются мосты и включается питание прово-

локи. Выходной сигнал каждого из преобразователей не должен превышать 2В. Интеграл магнитного поля определяется по сумме показаний обоих вольтметров по формуле (5).

Разработанным магнитометром измерялся интеграл магнитного поля в зазоре вигглер-магнита, при значении индукции магнитного поля 0,3Т. Недокомпенсация интеграла магнитного поля составляла 10^{-3} Тм.

Изменение положения магнитометра в магнитном поле вигглер-магнита производилось вручную. Время одного замера не превышало 10 сек. На рис.8 приведена фотография внешнего вида магнитометра, а на рис.9 показан магнитометр в зазоре вигглер-магнита.

Дальнейшее усовершенствование магнитометра связано со снижением уровня шумов с целью уменьшения порога чувствительности и повышения динамического коэффициента, автоматизацией съема информации и обработки результатов для сокращения времени измерения и проведением конструктивных доработок для обеспечения возможности одновременного измерения интеграла магнитного поля вигглер-магнитов и других магнитных структур в пространственных координатах.

Автор выражает благодарность М.Л.Петросяну за полезные обсуждения и постоянный интерес к работе.

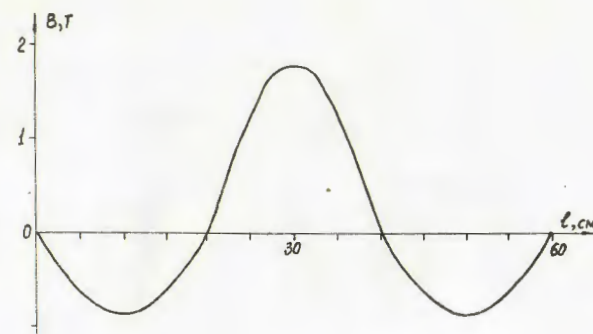


Рис.1

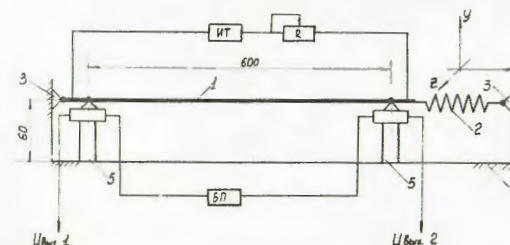


Рис.2

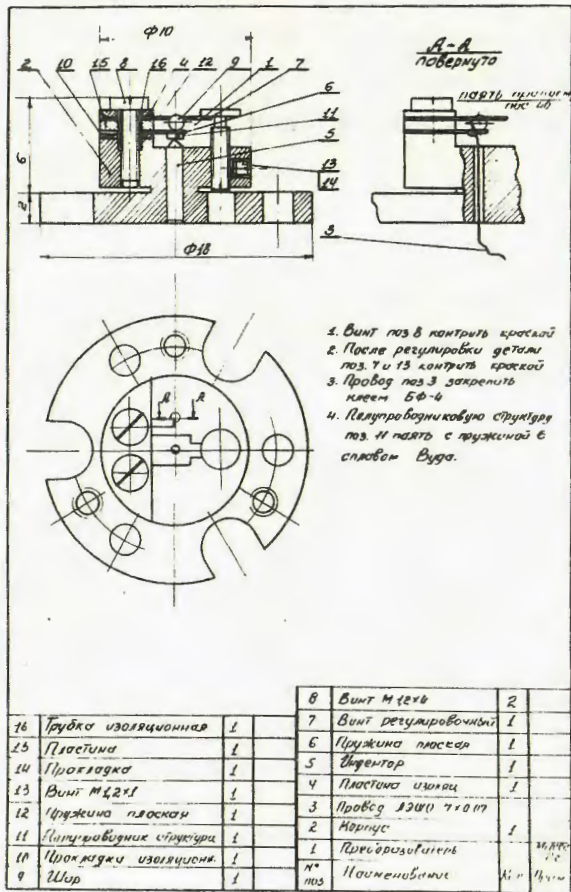


Рис.3

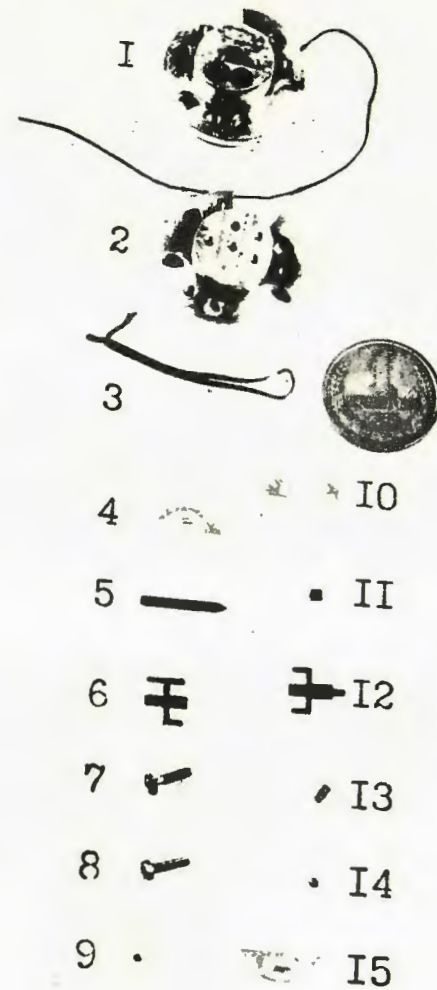


Рис.4

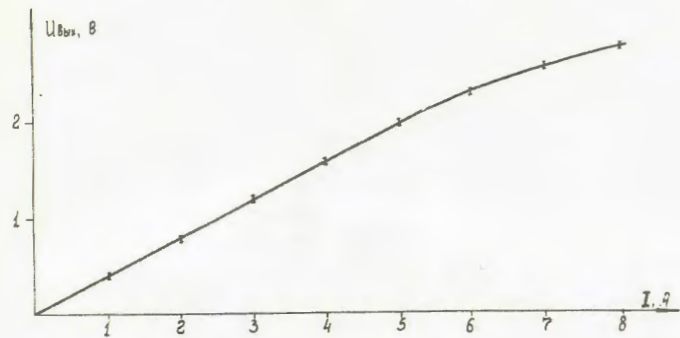


Рис. 5

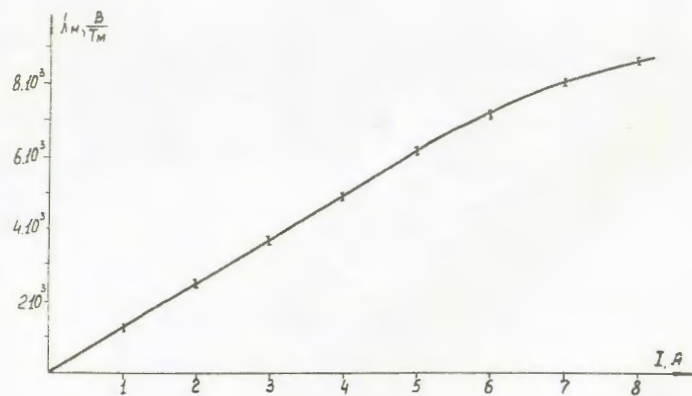


Рис. 6

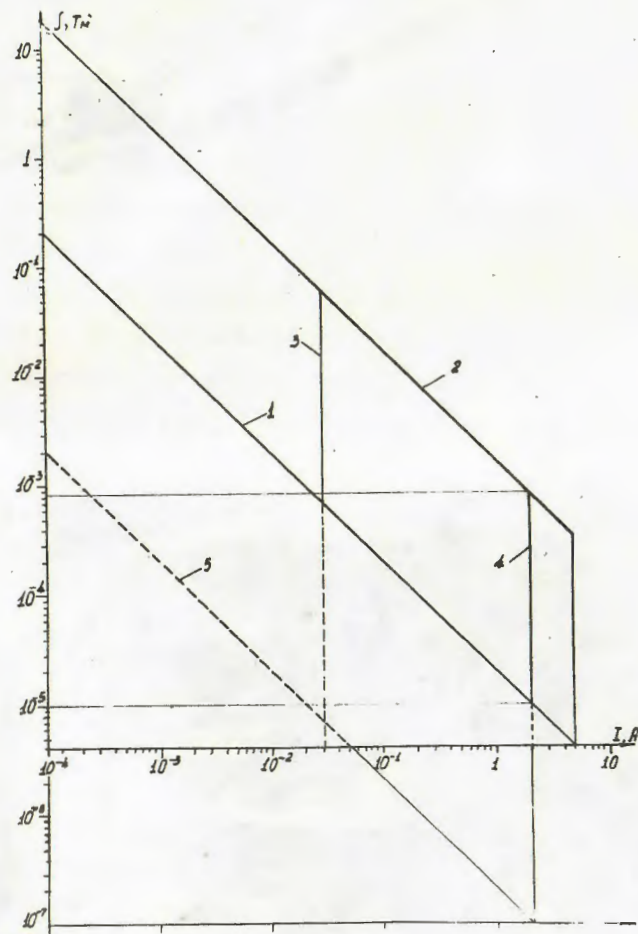


Рис. 7

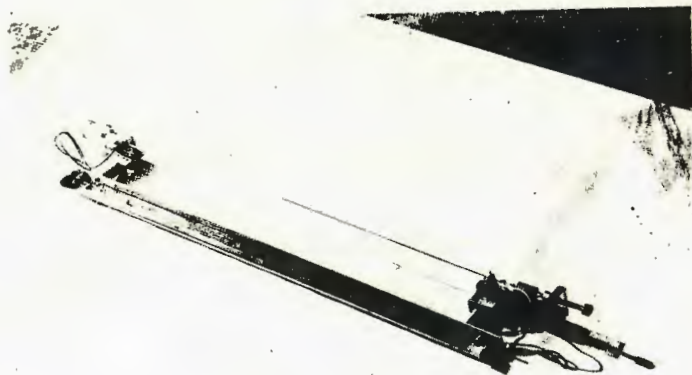


Рис.8

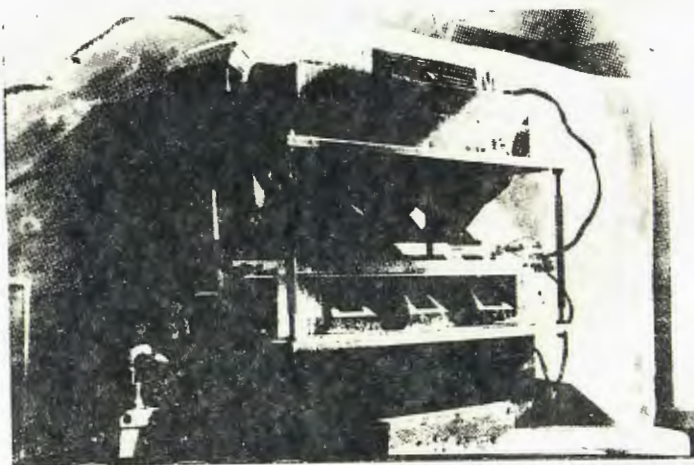


Рис.9

Подписи к рисункам

- Рис.1 Распределение магнитной индукции поля вигглер-магнита в вертикальной плоскости
- Рис.2 Схематическая конструкция магнитометра
- Рис.3 Общий вид полупроводникового пьезорезистивного преобразователя
- Рис.4 Внешний вид и отдельные детали полупроводникового пьезорезистивного преобразователя
- Рис.5 Зависимость выходного сигнала магнитометра от величины тока в проводнике
- Рис.6 Зависимость чувствительности магнитометра от величины тока в проводнике
- Рис.7 Зависимость предельных значений измеряемого магнитометром интеграла магнитного поля от величины тока в проводнике
- Рис.8 Внешний вид магнитометра
- Рис.9 Магнитометр в зазоре вигглер-магнита.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кульбеда В.Е., Рубчинский С.М. Труды Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. I, 663, М. 1970.
2. Васильев А.А., Дзергин А.И., Скепский Г.П., Алешин В.Ф. Труды Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. I, 626, М., 1970.
3. Агейкин Д.И., Костина Е.Н., Кузнецова Н.Н. Датчики контроля и регулирования, М., Машиностроение, 1965.
4. Козодаев М.С., ИТЭФ-85, 1974.
5. Бабаян А.З., Тепоян Л.О., Туманян А.Р. Научное сообщение ЕФИ-324-78.
6. A Cattoni, M. Piccolo, F. Ronga. LNF-71/12, 1971

Рукопись поступила 11-го ноября 1980 г.

Редактор Л.П.Мукаян

Тех.Редактор А.С.Абрамян

Заказ 33

ВФ- 05493

Тираж 299

Препринт ЕФИ

Формат издания 60x34/16

Подписано к печати 20/1-81г. I, 3уч.изд.л. Ц. 9 к.

Издано Отделом научно- технической информации
Ереванского физического института, Ереван-36, пер.Маркаряна 2