

23 225 69

# И Н С Т И Т У Т ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СОАН С С С Р

И Я Ф 9 - 70

Б.А.Баклаков, М.М.Карлинер, В.В.Левичев,  
А.С.Медведко, И.Я.Протопопов

ПРИМЕНЕНИЕ ДАТЧИКОВ ХОЛЛА ДЛЯ  
ПРЕЦИЗИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Новосибирск

1970

Б.А.Баклаков, М.М.Карлинер, В.В.Левичев,

А.С.Медведко, И.Я.Протопопов

## ПРИМЕНЕНИЕ ДАТЧИКОВ ХОЛЛА ДЛЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

### А Н Н О Т А Ц И Я

Рассматриваются условия и требования к датчикам Холла, обеспечивающие прецизионные измерения магнитного поля в электромагнитах ускорителей и накопительных колец. Приведены параметры некоторых образцов датчиков Холла, использованных в измерительных установках. Рассматриваются факторы, влияющие на погрешность измерений.

$$\frac{\Delta(H)}{H} = \frac{1}{H} \left( H_T \Delta a + E_m \Delta d + \Delta E_m \gamma + \Delta E_m \alpha \right) + \frac{\Delta I_{\text{пит}}}{I_{\text{пит}}}$$

где  $H$  - напряженность магнитного поля / э /

$\gamma$  - чувствительность датчика Холла / мкВ / э

$\Delta \gamma$  - температурный коэффициент чувствительности /  $\frac{\Delta \gamma}{\Delta t}$  /

$\Delta E_m$  - температурный коэффициент нелинейности

$\Delta t$  - температурный диапазон / °С /

Изготовление и наладка электромагнита накопителя электрон-позитронных пучков ВЭПП-3 /1/ требует проведения, примерно  $(1,5 \div 2) \cdot 10^6$  измерений магнитного поля в пределах  $3 \div 20$  кэ с погрешностью не более  $\pm 1 \cdot 10^{-3}$ . Для выполнения такого количества измерений необходима автоматическая измерительная система /2/ с последующей обработкой результатов на ЭВМ. Результатом обработки являются средние значения полей, градиентов, нелинейностей и другие, характеризующие магнитную систему параметры /3/.

В ИЯФ СО АН СССР разработана измерительная установка, использующая в качестве измерительных элементов датчики Холла, как в групповом, так и в одиночном варианте. Представляет интерес рассмотреть некоторые особенности использования датчиков Холла для прецизионных измерений. В установке применялись малогабаритные датчики с рабочей площадью не более  $4 \text{ мм}^2$ . Краткие технические характеристики рассматриваемых датчиков приведены в таблице 1.

Общая погрешность измерения магнитного поля датчиком Холла, не включающая погрешности отсчетного прибора, масштабного усилителя и цифрового вольтметра, погрешности калибровки [ЯМР], угла наклона датчика относительно осей координат, а также естественного старения, которое учитывается периодической калибровкой, может быть представлена выражением:

$$\frac{\Delta(H\gamma)}{H\gamma} = \frac{1}{H\gamma} \left( H\gamma \cdot \alpha_x \cdot \Delta t + E_{нэ} \cdot \alpha_{нэ} \cdot \Delta t + \Delta E_{нэ,др} + \Delta E_{к,нэ} \right) + \frac{\Delta I_{пит}}{I_{пит}},$$

где  $H$  - напряженность магнитного поля / э / ,

$\gamma$  - чувствительность датчика Холла  $\left| \frac{\text{МКВ}}{\text{э}} \right|$  ,

$\alpha_x$  - температурный коэффициент чувствительности  $\left| \frac{1}{^\circ\text{C}} \right|$  ,

$\alpha_{нэ}$  - температурный коэффициент неэквипотенциальности  $\left| \frac{1}{^\circ\text{C}} \right|$  ,

$\Delta t$  - температурный диапазон / $^\circ\text{C}$ / ,

Таблица 1

ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДАТЧИКОВ ХОЛЛА

№ п.п.	Тип датчика Характеристика	ИПАИ Ш тип	ДХГ -0,5м	Х 511	ПНХ-1	СКВ ИПАИ
1.	Чувствительность при ра- бочем токе / $\frac{мкВ}{э}$ /	20 ÷ 50	10	10 ÷ 15	15 ÷ 30	10 ÷ 15
2.	Рабочий ток /ма/	50	12	100	10	180
3.	Температурный коэффици- ент чувствительности /°С/	0,03 ÷ 0,05	0,04	0,01 ÷ 0,05	0,01 ÷ 0,05	0,01 ÷ 0,03
4.	Входное и выходное со- противление /ом/	5 ÷ 100	40 ÷ 120	0,7 ÷ 7	50 ÷ 150	1 ÷ 3
5.	ЭДС неэквивалентналь- ности /в/	< 5.10 <sup>-3</sup>	< 1.10 <sup>-3</sup>	0,25.10 <sup>-3</sup>	< 2.10 <sup>-3</sup>	0,1.10 <sup>-3</sup>
6.	Температурный коэффи- циент ЭДС неэквивалент- нальности /°С/	< 2	< 2	< 2	-6 ± +6	1 + 2
7.	Рабочая площадь датчи- ка /мм <sup>2</sup> /	1,5 x 1,0	2,6 x 1,6	1,5 x 0,8	1,5 x 1,0	1,5 x 0,5

$\Delta E_{нэ.др}$  - временной дрейф напряжения неэквипотенциальности /мкв/,

$\Delta E_{кнэ}$  - температурный и временной дрейф источника компенсации неэквипотенциальности /мкв/,

$\frac{\Delta I_{пит}}{I_{пит}}$  - нестабильность тока питания датчиков.

Кратко рассмотрим составляющие погрешности. Здесь

$\alpha_x \cdot \Delta t$  и  $\frac{E_{нэ.др} \cdot \alpha_{нэ} \cdot \Delta t}{H \cdot \gamma}$  представляют погрешности, оп-

ределяемые температурными коэффициентами чувствительности

$\alpha_x$  и неэквипотенциальности  $\alpha_{нэ}$ .

Для уменьшения этих составляющих погрешности были отобраны датчики с малыми температурными коэффициентами чувствительности и неэквипотенциальности.

Из выпускаемых серийно датчиков Х511 можно подобрать датчики (примерно, из десяти - один) с температурным коэффициентом чувствительности, порядка  $\pm 1 \cdot 10^{-4} \frac{1}{^\circ\text{C}}$ , температурным коэффициентом неэквипотенциальности  $\pm (1 \div 2) \cdot 10^{-2} \frac{1}{^\circ\text{C}}$  и с абсолютной величиной ЭДС неэквипотенциальности до  $0,1 \cdot 10^{-3}$  в. Существенное снижение влияния названных погрешностей получено помещением датчика Холла в активный термостат. Термостат с электрическим нагревом для одиночного датчика объемом 1-2 см<sup>3</sup> обеспечивает постоянство температуры  $\pm 0,1^\circ\text{C}$  на уровне  $+ 50^\circ\text{C}$  при перепадах внешней температуры до  $30^\circ\text{C}$ .

Результирующие погрешности по данным факторам получены  $\pm (1 \div 2) \cdot 10^{-5}$  в поле  $H=10^3$  э и чувствительности  $\gamma \approx 15 \frac{\text{мкв}}{\text{э}}$ . Вторая составляющая погрешности снижается с увеличением уровня измеряемого поля, но при использовании датчиков, у которых  $E_{нэ} > 100$  мкв влияние увеличивается. Характер зависимости ЭДС неэквипотенциальности от тока  $E_{нэ} = f(I_{пит})$  у датчиков сильно различается и зависит, например, от направления тока через датчик. При некотором токе  $E_{нэ}$  может принимать нулевые значения при заданной температуре. Это иллюстрируется кривыми 1,2 на рис.1.

Отмечено также, что температурный коэффициент  $\alpha_{нэ}$  ЭДС неэквипотенциальности у некоторых датчиков изменяется в зависимости от тока через датчик и при изменении тока в несколько раз (по данным до 5 раз) меняется и  $\alpha_{нэ}$ .

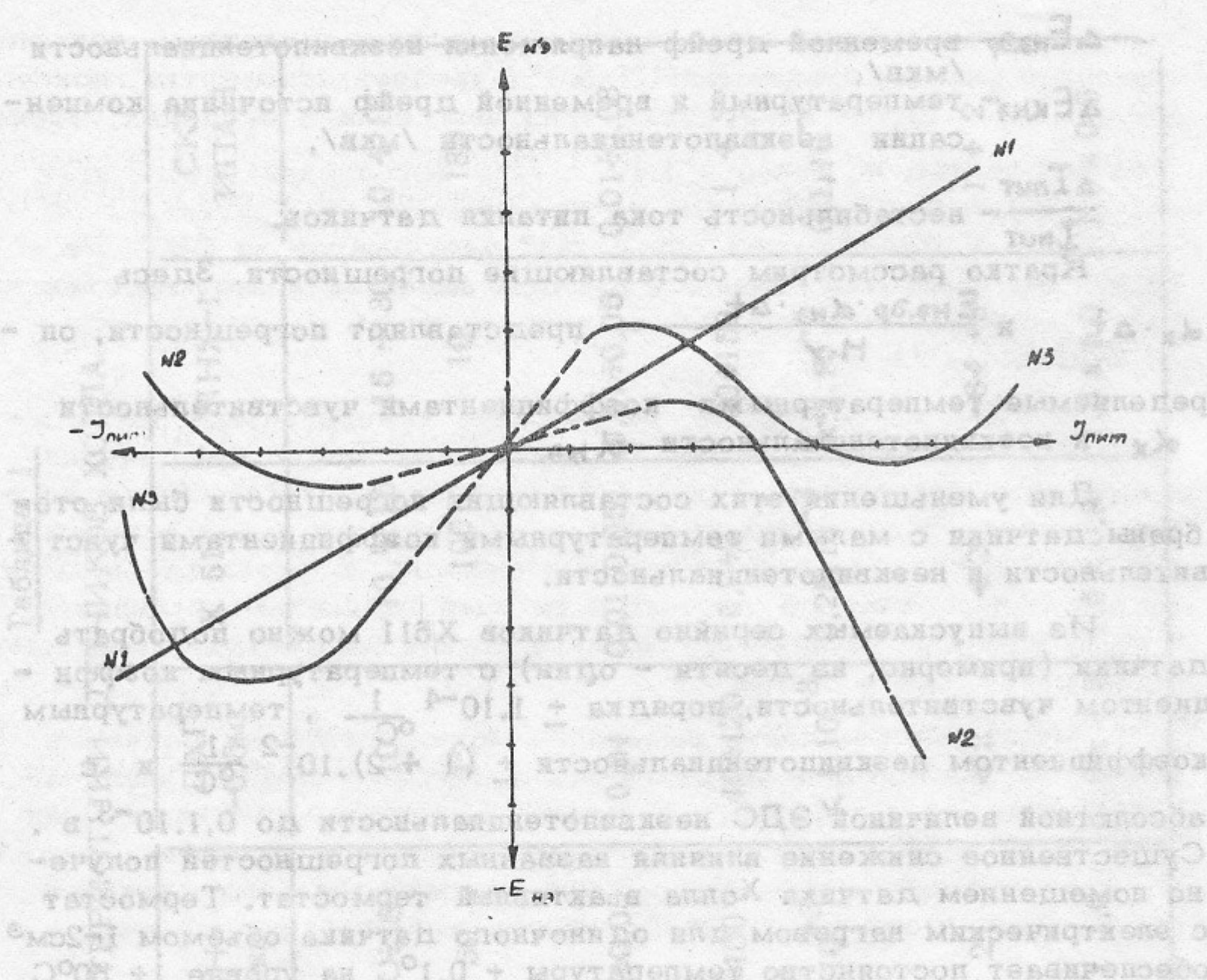


Рис.1. Зависимость ЭДС неэквипотенциальности от тока через датчик для разных образцов.  
 № 1 - для большинства датчиков всех типов.  
 № 2 и № 3 - отклонения от нормальной кривой.

Следовательно, для использования датчика Холла в прецизионной схеме необходимо снять зависимости  $E_{нэ} = f(I_{пит})$ ,  $\alpha_{нэ} = f(I_{пит})$  и выбрать наилучший режим. Температурный коэффициент  $\alpha_{нэ}$  у датчиков с близким температурным коэффициентом чувствительности  $\alpha_x$  может значительно отличаться.

Известно, что при изменении измеряемого поля сопротивление датчика увеличивается по квадратичному закону, причём это изменение в диапазоне полей до 16 кэ, порядка, 20%. За счёт этого

эффекта изменяется мощность, рассеиваемая датчиком, при стабилизированном токе питания. Это приводит к тому, что калибровку датчика Холла и измерение поля необходимо проводить с учётом инерционности нагрева. Обычно установление температуры заканчивается в течение единиц секунд. Изменение рабочей температуры датчика учитывается калибровкой.

Погрешность, определяемая дрейфом ЭДС неэквипотенциальности  $\frac{\Delta E_{нэ.др}}{H \cdot \gamma}$  наиболее существенны при измерении малых полей. Длительные наблюдения дрейфа показали, что этот дрейф у датчиков типа ПНХ-1 составляет в среднем  $0,4 \div 0,5 \frac{\text{э}}{\text{час}}$ , у датчиков типа Х511  $0,3 \div 3 \frac{\text{э}}{\text{час}}$ ; у датчиков ИПАН  $0,2 \div 2,5 \frac{\text{э}}{\text{час}}$  и более, и у датчиков СКБ ИПАН  $0,2 \div 0,7 \frac{\text{э}}{\text{час}}$ . Погрешность, определяемая дрейфом на уровнях полей, порядка  $10^3 \text{ э}$  составляет на лучших экземплярах датчиков  $\pm 2 \cdot 10^{-4}$ . Исследования дрейфа  $E_{нэ}$  проводились при размещении термостатированного датчика Холла в пермаллоевый экран, при питании от стабилизированного источника тока с помощью потенциометра типа Р309 и самописца.

Часто для компенсации ЭДС неэквипотенциальности последовательно в цепь Холловских электродов включается источник напряжения компенсации. Погрешность  $\frac{\Delta E_{к.нэ}}{H \cdot \gamma}$  представляет дрейф источника компенсации неэквипотенциальности, влияние которого эквивалентно дрейфу ЭДС неэквипотенциальности, но с существенным отличием, заключающимся в том, что его можно значительно снизить. Достигается это выбором соответствующего источника напряжения компенсации и высокостабильными элементами схемы. В установках были использованы специально разработанные стабилизаторы напряжения и схема регулирования с разрешением до 1 мкв, выполненная на прсволочных сопротивлениях из манганина. Результирующая погрешность на уровне  $H=10^3 \text{ э}$  получена, порядка  $\pm (0,5 \div 1) \cdot 10^{-4}$ . Эта погрешность зависит от уровня поля и уменьшается с его увеличением.

Для уменьшения нелинейности характеристики выходного напряжения Холла от поля датчик питается высокостабильным током. Нестабильность рабочего тока  $\frac{\Delta I_{пит}}{I_{пит}}$  в разработанных уста-

новках составляет для группы датчиков  $\pm (1 \div 2) \cdot 10^{-4}$  и для оди-

ночного датчика  $\pm (3 \div 5) \cdot 10^{-5}$  при токе до 200 ма. Нелинейность характеристики выходного напряжения Холла получена до  $\pm 3\%$  при изменении поля до  $2 \cdot 10^4$  э.

Датчики Холла подвержены естественному старению, что приводит с одной стороны к стабилизации их параметров, а с другой стороны к дрейфу чувствительности. По данным длительных измерений на датчиках ИПАН в течение месяца дрейф составляет порядка  $5 \cdot 10^{-4} - 1 \cdot 10^{-3}$ , однако, встречаются датчики с дрейфом более  $10^{-2}$ , которые необходимо отбраковывать.

Эта погрешность устраняется периодической калибровкой и, по-видимому, сроки калибровки должны определяться опытным путем до выяснения скорости дрейфа. Для более стабильной работы датчиков проводится предварительная стабилизация их параметров путем пропускания номинального рабочего тока через датчик непрерывно в течение месяца.

При измерениях, в которых участвует группа датчиков, поочередное их подключение осуществляется с помощью электромеханических реле. Высокие требования предъявляются к контактным группам реле, входящим в цепь коммутации. Исследования показали, что наименьший временной дрейф и термоэдс имеют реле типа РМУГ с малой потребляемой мощностью по обмотке возбуждения. Величина суммарного дрейфа составляет  $30 \div 40 \frac{\text{мкВ}}{\text{час}}$ . Для уменьшения термоэдс подводы к усилителю от датчиков Холла через реле осуществляются медными проводниками (без лужения) и пайкой кадмиево-оловянным припоем.

При испытаниях датчиков Холла был обнаружен также эффект, который проявляется при повороте датчика Холла, так чтобы магнитное поле было направлено параллельно поверхности датчика, но перпендикулярно линиям тока (рис.2). Некоторые датчики при этих условиях дают на выходе ЭДС, зависимость которой от магнитного поля описывается четной функцией вида, изображенного на рис.3. Величина этой ЭДС при поле порядка  $10^4$  э доходит до  $3\%$  от ЭДС при перпендикулярном к поверхности датчика направлению поля. При измерении таким датчиком нормальной составляющей магнитного поля возникает значительная погрешность вследствие влияния тангенциальной составляющей поля. Величина этой погрешности зависит от угла наклона магнитного поля.



Следует отметить, что датчики, у которых описанный эффект сильно выражен, изменяют величину ЭДС на выходе при перемене знака поля (без изменения его абсолютной величины) даже при отсутствии тангенциальной составляющей поля. Изменение может достигать  $1 \div 2\%$ . Датчики с выраженным чётным эффектом, по-видимому, непригодны для прецизионных измерений и должны отбраковываться.

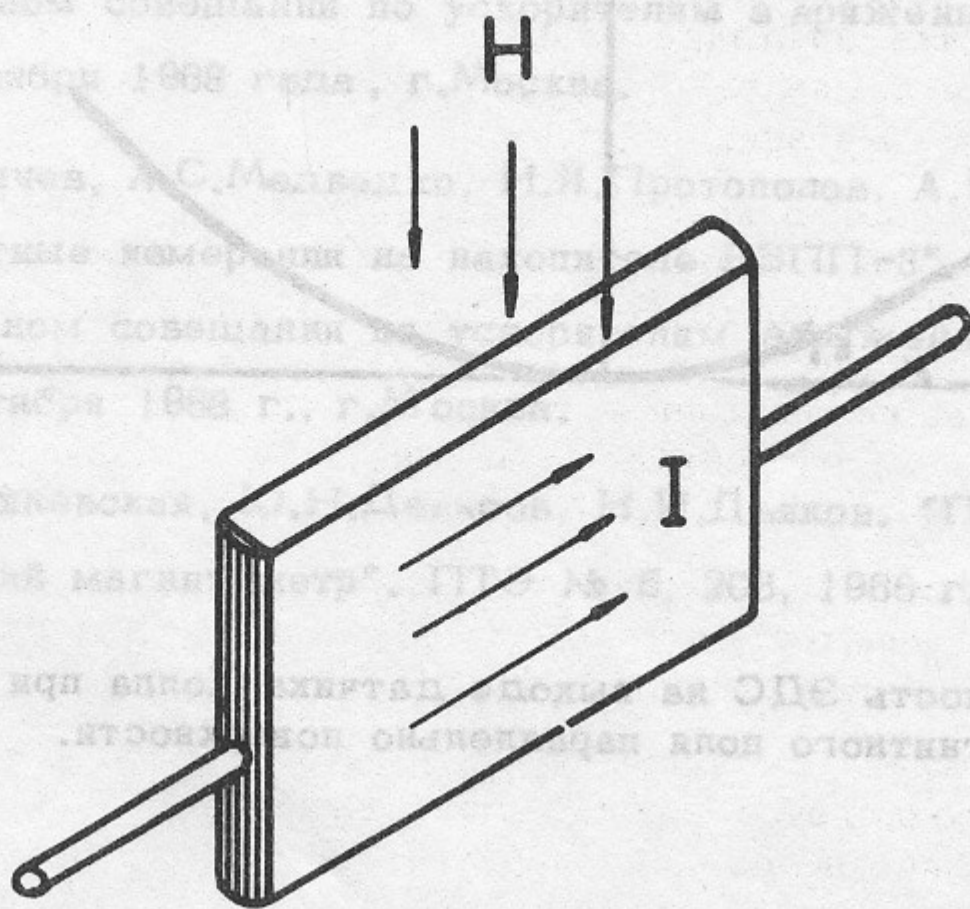


Рис.2. Направление магнитного поля при наблюдении четного эффекта.

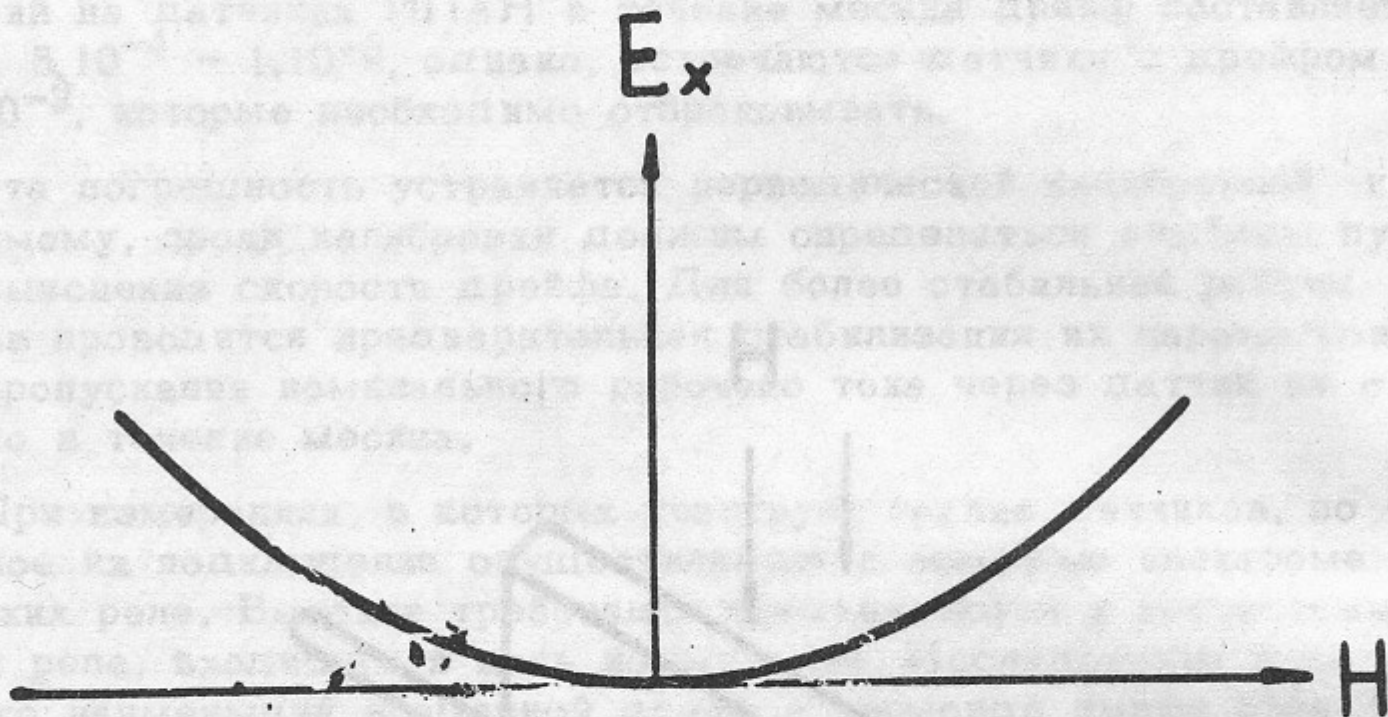


Рис.3. Зависимость ЭДС на выходе датчика Холла при направлении магнитного поля параллельно поверхности.

## Л и т е р а т у р а

1. Н.А.Кузнецов, Б.Е.Левичев, И.Я.Протопопов, А.Н.Скринский "Магнитная система накопителя ВЭПП-3". Доклад на Всесоюзном совещании по ускорителям заряженных частиц 9-16 октября 1968 г., г.Москва.
2. Б.А.Баклаков, М.М.Карлинер, Б.В.Левичев, А.С.Медведко, И.Я.Протопопов. "Устройство для прецизионных измерений магнитного поля в электромагните накопителя". Доклад на Всесоюзном совещании по ускорителям заряженных частиц, 9-16 октября 1968 года, г.Москва.
3. Б.В.Левичев, А.С.Медведко, И.Я.Протопопов, А.Н.Скринский "Магнитные измерения на накопителе ВЭПП-3". Доклад на Всесоюзном совещании по ускорителям заряженных частиц 9-16 октября 1968 г., г.Москва.
4. Д.П.Василевская, Ю.Н.Денисов, Н.И.Дьяков. "Прецизионный холловский магнитометр". ПТЭ № 5, 203, 1966 г.

1. Н.А. Кузнецов, Б.В. Лавров, Н.А. Протопопов, А.Н. Сидоркин  
"Магнитная система наконечника БЭП-3". Доклад на Всесоюзном совещании по усовершенствованию арматурных частей 8-16 октября 1968 г., г. Москва.

2. Б.А. Баклаков, М.М. Карякин, Б.В. Лавров, А.С. Мельников, Н.А. Протопопов.  
"Усовершенствование для промышленных измерений магнитного поля в электромагните наконечника". Доклад на Всесоюзном совещании по усовершенствованию арматурных частей 8-16 октября 1968 года, г. Москва.

3. Б.В. Лавров, А.С. Мельников, Н.А. Протопопов, А.Н. Сидоркин  
"Магнитная система наконечника БЭП-3". Доклад на Всесоюзном совещании по усовершенствованию арматурных частей 8-16 октября 1968 г., г. Москва.

4. А.П. Васильевская, Ю.Н. Денисов, М.Н. Дьяков, "Применение коллоидной магнетометрии". ИТЭ № 5, 208, 1968 г.

Рис. 2. Зависимость ЭДС на выходе датчика Холла при напряжении питания от магнитного поля параллельно оси датчика.

---

Ответственный за выпуск Б.А. Баклаков  
Подписано к печати 11.2.70  
Усл. 0,4 печ.л., тираж 150 экз. Бесплатно  
Заказ № 9 . ПРЕПРИНТ

---

Отпечатано на ротационной машине в ИЯФ СО АН СССР, н.в.