

4 0222
Б-54

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

4/IX - 64.

P-1689



Ю.Бетко, И.Гласник, М.Полак, И.Пузяк

ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

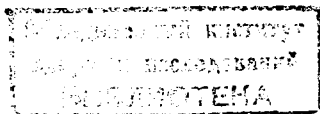
РАЗБОР ОДНОЙ СХЕМЫ
ДЛЯ МАГНИТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ
ПРИ ПОМОЩИ ДАТЧИКОВ ХОЛЛА

1964

Ю.Бетко, И.Гласник, М.Полак, И.Пузяк

РАЗБОР ОДНОЙ СХЕМЫ
ДЛЯ МАГНИТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ
ПРИ ПОМОЩИ ДАТЧИКОВ ХОЛЛА

2611/3 чр.



1. Введение

Исследование пространственного распределения (топографирование) магнитного поля в воздухе и измерение его градиента можно производить с помощью датчиков Холла^{1-4/}.

Наиболее простым способом топографирования является последовательное измерение индукции одним датчиком в различных точках поля. Недостатком этого метода является то, что на точность измерений в большой мере влияет временная нестабильность магнитного поля и тока питания датчика, а также температурная зависимость датчика.

Предлагается схема с двумя или тремя датчиками, которая исключает или уменьшает погрешности в измерениях от вышеуказанных влияний. Приводится разбор ошибок и сравнение точности обоих способов. Предложенная схема была проверена при длительных измерениях на больших магнитах постоянного тока и магнитных линзах.

2. Принцип метода

При использовании настоящего метода предполагается, что малые отклонения (максимально несколько процентов) абсолютного значения индукции B от установленного значения B_0 практически не влияют на пространственное распределение поля в воздушном зазоре. При этом влияние временной нестабильности индукции на точность топографирования поля можно исключить следующим способом.

Вместо последовательного измерения индукции в различных точках поля одним датчиком Холла измеряется относительное значение

$$\lambda = \frac{B_1}{B} \quad (2.1)$$

при помощи двух датчиков Холла. Здесь B_1 - индукция в любой точке поля, B - индукция в относительной точке в момент измерения B_1 , причем значения B_1 и B отсчитываются по приборам одновременно.

Если абсолютное значение поля в различных точках со временем изменяется, то изменяются одновременно и B_1 и B , но в одинаковом соотношении и, таким образом, значения λ остаются неизменными.

Найденные значения λ во всем пространстве поля дают картину его пространственного распределения.

Если нас интересуют абсолютные значения индукции B_x в различных точках поля, то достаточно умножить значения λ_x на индукцию B_0 в относительной точке (которое не всегда должно совпадать со значением в период измерения B), т.е.

$$B_x = \lambda_x B_0 = B_x \frac{B_0}{B} \quad (2.2)$$

При снятии пространственного распределения градиента магнитного поля в воздухе влияние временной нестабильности поля исключается аналогично. Вместо абсолютного градиента в точке 1

$$I_x = \frac{B_1 - B_2}{l} \quad (2.3)$$

где B_1, B_2 - индукция в точках 1, 2, достаточно близких между собой; l - расстояние между точками 1, 2; измеряем I' :

$$I' = \frac{B_1 - B_2}{l} \frac{1}{B} \quad (2.4)$$

где B - индукция в относительной точке в момент измерений B_1, B_2 . Из известных значений I' определяем абсолютное значение градиента:

$$I_x = \frac{B_1 - B_2}{l} \frac{B_0}{B} \quad (2.5)$$

Практически выбираем $l = 1$ см (размещаем датчики для измерения B_1, B_2 на расстоянии между собой в 1 см) и если индукцию измеряем в гауссах, то градиент (2.3), (2.5) получаем в гаусс/см.

3. Схема включения датчиков Холла

Схема включения датчиков Холла для метода, описанного в разделе 2, должна исключить также влияние колебания тока питания датчиков. Это условие выполняется при последовательном включении датчиков по схеме, показанной на рис. 1. Так как зависимость напряжений Холла от тока возбуждения датчиков линейная, значения

$$\lambda_1 = \frac{B_1}{B} = \frac{U_1}{U} \quad \lambda_2 = \frac{B_2}{B} = \frac{U_2}{U}$$

не будут зависеть от тока возбуждения датчиков. При этом предполагается одновременный отсчет напряжений всех датчиков.

Датчик HS (рис. 1) закреплен неподвижно в поле (в относительной точке), датчики HS_1, HS_2 установлены на подвижном устройстве. При измерении относительных значений индукции λ_1, λ_2 датчики HS_1, HS_2 размещены независимо друг от друга и возможно одновременное измерение в двух точках. При измерении градиента датчики HS_1, HS_2 расположены на общем основании на расстоянии 1 см один от другого.

4. Погрешности при измерении индукции одним датчиком

Напряжение датчика Холла (рис. 2) зависит от индукции следующим образом:

$$U = k I B \cos \beta + U_r, \quad (4.1)$$

где

$$k = \frac{G R_H}{d},$$

причем G - коэффициент, зависящий от геометрических размеров датчика, индукции и температуры; R_H - постоянная Холла, зависящая от чистоты состава полупроводника; d - толщина пластинки датчика; I - ток питания датчика; β - угол между вектором индукции и перпендикуляром к пластинке датчика; U_r - напряжение шумов датчика. Обозначим в уравнении (4.1) функциональные переменные отдельных величин

$$U = k(B, T) \cdot I(t) B(r, t) \cos \beta + U_r(t), \quad (4.2)$$

где T - температура, t - время, r - параметр положения датчика.

Если бы при измерении индукции с помощью датчика Холла все условия (температура, ток питания датчика, перпендикулярность датчика к направлению поля, класс точности измерительных приборов U и I) были выдержаны такими, какими они были при градуировке датчика, то точность измерения была бы такой же, как и точность градуировки.

Практически все эти условия выполнить трудно, а поэтому нужно знать, как влияют эти переменные параметры на точность измерений.

Если вышеуказанные параметры изменяются мало и случайно, то средне-квадратичное отклонение напряжения Холла пропорционально произведению первой производной переменной величины и её среднего квадратичного отклонения.

Относительная погрешность измерения индукции с одним датчиком (предполагается, что во время измерений индукция не изменяется во времени) дана выражением:

$$\Delta_{B_u} = \frac{\Delta B}{B} = \frac{\Delta U}{U} = \frac{1}{U} \sqrt{\left(\frac{\partial U}{\partial T} \Delta T\right)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial I} \Delta I\right)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial \beta} \Delta \beta\right)^2 + (\Delta U_r)^2 + (\delta_{U_H})^2}, \quad (4.3)$$

где $\Delta T, \Delta I, \Delta \beta, \Delta U_r$ обозначают средние квадратичные отклонения по сравнению с градуировкой, которую мы сейчас считаем абсолютно точной.

δ_{U_H}, U_H - обозначают класс точности прибора, измеряющего U , и его предельное отклонение.

Теперь разберем отдельные погрешности в уравнении (4.3).

Температурная погрешность

$$\Delta T = \frac{1}{U} \frac{\partial U}{\partial T} \Delta T = \alpha_H \Delta T, \quad (4.4)$$

где

$$\alpha_H = \frac{1}{U} \frac{\partial U}{\partial T} 100 \text{ [\% / } ^\circ\text{C]}.$$

так называемый температурный коэффициент, который, например, у датчика из мышьяковистого индия $|\text{InAs}|$

$$\alpha_H = - (0,04 - 0,08) \% / ^\circ\text{C}.$$

Значит, при отклонении температуры датчика от градуировки $\Delta T = -2 - 5^\circ\text{C}$, $\Delta U = 0,08 \pm 0,4\%$. Для более точных измерений требуется знать значение α_H каждого датчика и вносить температурные коррекции.

Погрешность установки тока питания датчика зависит от класса точности используемого измерительного прибора

$$\Delta I = \frac{1}{U} \frac{\partial U}{\partial I} \Delta I = \frac{\delta_I \cdot I_H}{I}, \quad (4.5)$$

где δ_I , I_H , I - класс точности, предельное отклонение, измеряемый ток, соответственно.

При использовании потенциометра постоянного тока погрешность ΔI порядка 0,02%, а при использовании прибора магнито-электрической системы погрешность ΔI равна 0,2%, т.е.

$$\Delta I = 0,02 - 0,2 \%.$$

Неперпендикулярность датчика Холла к направлению магнитного поля вносит в измерение индукция погрешность

$$\Delta \beta = \frac{1}{U} \frac{\partial U}{\partial \beta} \Delta \beta = \left(\frac{\Delta \beta}{2} \right)^2, \quad (4.6)$$

причем мы считали приближенно $\frac{\partial U}{\partial \beta} = \sin \beta = \beta$ и за β взяли середину интервала $\beta = \frac{\Delta \beta}{2}$.

Допустим, неточность установки датчика $\Delta \beta = 1,5^\circ = 0,02618$ рад. Этому соответствует погрешность $\Delta \beta = 0,03\%$. При изготовлении прецизионного приспособления для укрепления и передвижения датчика в поле можно получить более точные результаты.

Влияние уровня шумов на точность измерений зависит от температурной нестабильности.

Для датчиков из InAs уровень шумов порядка 10 мкВ и его колебания около 1 мкВ, т.е. при чувствительности 10 мкВ/гаусс относительная погрешность

$$\Delta U_n < \frac{1/10}{B} = \frac{0,1}{B}, \quad (4.7)$$

(индукция дана в гауссах). При индукции порядка 1 гаусса $\Delta U_n \sim 1\%$, но при 1000 гауссах $\Delta U_n \sim 0,01\%$.

Погрешность, обусловленная неточностью прибора, измеряющего напряжение, аналогична погрешности при установке тока

$$\delta = \Delta_U = \frac{\delta_U \cdot U_H}{U}. \quad (4.8)$$

Обычно $\Delta_U = 0,02 - 0,2\%$.

Кроме погрешностей, указанных в уравнении (4.3), учитываются еще две погрешности: погрешность градуировки, т.е. снятия кривой $B = f(U)$, и погрешность отсчета по кривой градуировки. При использовании метода ядерного резонанса получается точность градуировки

$$\Delta_g = 0,01 - 0,1\%.$$

Пользуясь уточненными методами отсчета по кривой градуировки, можно получать точность

$$\Delta_{от} = 0,01 - 0,05\%.$$

Конечная погрешность при измерении индукции с одним датчиком

$$\Delta_B = \sqrt{(\Delta_{B_0})^2 + (\Delta_g)^2 + (\Delta_{от})^2}. \quad (4.9)$$

Заменяя частичные погрешности в уравнении (4.9) вышеуказанными числовыми значениями, конечную погрешность получаем в пределах

$$\Delta_B = 0,1 - 0,5\%,$$

причем мы предполагали, что магнитное поле во времени не изменяется. При исследовании распределения магнитного поля в пространстве это условие является очень важным.

5. Погрешности при измерении пространственного распределения индукции

Обсудим сначала самый простой случай, когда пространственное распределение индукции исследуется последовательным измерением абсолютного значения индукции в различных точках поля с одним датчиком Холла.

К погрешности, указанной в уравнении (4.9), теперь добавляется относительная погрешность индукции за счет временной нестабильности поля Δ_{B_t} . Поэтому конечная погрешность топографирования поля с одним датчиком

$$\Delta_B = \sqrt{(\Delta_{B_0})^2 + (\Delta_g)^2 + (\Delta_{от})^2 + (\Delta_{B_t})^2}. \quad (5.1)$$

В самом совершенном магнитном оборудовании можно предполагать точность стабилизации магнитной индукции 10^{-4} , в обычном лабораторном оборудовании — точность 10^{-2} . Подставляя эти значения в формулу (5.1) получаем, что при стабилизации 10^{-4} погрешность $\Delta_B = 0,1\%$ практически не ухудшается, при стабилизации 10^{-2} ухудшается на $\Delta_B = 1,01\%$. Погрешность $\Delta_B = 0,5\%$ при стабилизации 10^{-2} увеличивается на $\Delta_B = 1,12\%$.

Очевидно, что при самом прецизионном, самом совершенном измерительном оборудовании, но с одним датчиком Холла и при несовершенной стабилизации измеряемого поля точность измерения понижается приблизительно на 1-1,5%.

Сделаем разбор ошибок для схемы включения (рис. 1), где с помощью двух датчиков HS_I , HS_V измеряется по уравнению (2.1) значение λ .

Предполагаем, что при малых отклонениях параметров, вносящих погрешности, напряжение Холла U_0 прямо пропорционально индукции B_0 , т.е. относительное изменение напряжения

$$\Delta_U = \frac{\Delta U}{U_0},$$

вызванное любым влиянием, соответствует изменению индукции от B_0 до B по соотношению

$$B = B_0 / (1 + \Delta_U). \quad (5.2)$$

В первую очередь нас интересует влияние температурной зависимости датчиков Холла на точность измерений по этой схеме.

Если a_{H_V} и a_{H_I} — температурные коэффициенты датчиков HS_I и HS_V , Δ_{T_I} и Δ_{T_V} — отклонение их температуры при градуировке, B_I , B_V — индукция в точках при температуре измерений, а B_{I_0} , B_{V_0} — индукция при температуре градуировки, то относительное значение индукции при температуре градуировки $\lambda = \frac{B_{I_0}}{B_{V_0}}$ и при температуре измерений $\lambda = \frac{B_I}{B_V}$.

Предполагая, что температурному изменению напряжения Холла соответствует линейное изменение индукции, получим:

$$\lambda = \frac{B_I}{B_V} = \frac{B_{I_0} (1 + a_{H_I} \Delta_{T_I})}{B_{V_0} (1 + a_{H_V} \Delta_{T_V})} \lambda_0 \frac{1 + a_{H_I} \Delta_{T_I}}{1 + a_{H_V} \Delta_{T_V}}$$

Поэтому относительная погрешность вследствие температурного изменения

$$\Delta_{\lambda_T} = \frac{\lambda_0 - \lambda}{\lambda_0} = 1 - \frac{\lambda}{\lambda_0} = 1 - \frac{1 + a_{H_I} \Delta_{T_I}}{1 + a_{H_V} \Delta_{T_V}}$$

Пользуясь соотношением

$$\frac{1}{1 + a_{H_V} \Delta_{T_V}} \approx 1 - a_{H_V} \Delta_{T_V}$$

и пренебрегая выражением $\frac{a_{H_I} \Delta_{T_I} \Delta_{T_V}}{1 + a_{H_V} \Delta_{T_V}}$, получаем

$$\Delta_{\lambda_T} \approx a_{H_V} \Delta_{T_V} - a_{H_I} \Delta_{T_I}. \quad (5.3)$$

Из формулы (5.3) следует, что датчик с большим температурным коэффициентом должен иметь малое отклонение температуры ΔT и, наоборот, при датчике с меньшим температурным коэффициентом возможно большее отклонение температуры.

Например, при работе с датчиками из мышьяковистого индия, при $a_{H_I} = 0,03\%/^{\circ}\text{C}$, $a_{H_V} = -0,05\%/^{\circ}\text{C}$, $\Delta_{T_I} = -2^{\circ}\text{C}$, $\Delta_{T_V} = -4^{\circ}\text{C}$, погрешность $\Delta_{\lambda_T} = 0,054 - 0,082 = -0,04\%$.

Но если $\Delta_{T_I} = -4^{\circ}\text{C}$, $\Delta_{T_V} = -2^{\circ}\text{C}$, то погрешность $\Delta_{\lambda_T} = 0,052 - 0,084 = -0,22\%$, т.е. погрешность с теми же датчиками и при тех же температурах так же велика.

В случае, если датчики при измерении имеют одинаковую температуру, отличающуюся от температуры градуировки на ΔT , погрешность

$$\Delta_{\lambda_T} = (a_{H_V} - a_{H_1}) \Delta T. \quad (5.4)$$

Из обеих формул (5.3), (5.4) следует, что в случае $\Delta T_1 = \Delta T_V = \Delta T$ $a_{H_1} = a_{H_V}$, погрешность $\Delta_{\lambda_T} = 0$. Практически для получения такого значения следует брать датчики с очень близкими температурными коэффициентами.

Рассмотрим погрешность, которая вызвана неточностью установки датчика Холла по отношению к полю. При одном датчике согласно (4.6) $\Delta_{\beta} = \left(\frac{\Delta \beta}{2}\right)$. Для λ_{β} имеем

$$\Delta_{\lambda_{\beta}} = 1 - \frac{\lambda}{\lambda_0} = 1 - \frac{1 + \lambda_{\beta_1}}{1 + \lambda_{\beta_2}},$$

откуда

$$\Delta_{\lambda_{\beta}} = \Delta_{\beta_V} - \beta \Delta_{\beta_1}. \quad (5.5)$$

Из уравнения (5.5) следует, что погрешность от неточной установки датчиков определяется как разность погрешностей отдельных датчиков. Когда отклонения обоих датчиков одинаковы, погрешность $\Delta_{\lambda_{\beta}} = 0$.

Рассмотрим конкретный случай, когда один датчик установлен под углом $\Delta_{\beta_V} = 3^\circ$, второй — под углом $\Delta_{\beta_1} = 1,5^\circ$, тогда $\Delta_{\beta_1} = 0,03\%$, $\Delta_{\beta_V} = 0,06\%$ и $\Delta_{\lambda_{\beta}} = 0,03\%$. Аналогичным будет и рассуждение о влиянии напряжения шумов

$$\Delta_{\lambda_U} = U_{V_V} - \lambda U_{V_1}, \quad (5.6)$$

т.е. при одинаковых погрешностях отдельных датчиков конечная погрешность $\Delta_{\lambda_U} = 0$. По уравнению (4.7) Δ_{U_V} зависит от индукции, в которой датчик находится. Если, например, V_1 порядка 100 гаусс и V_V порядка 1000 гаусс, то $\Delta_{\lambda_U} = 0,1\%$. Погрешности измерения напряжений, градуировки и отсчета по кривой градуировки тоже влияют на Δ_{λ} как разность погрешностей отдельных датчиков.

Из совокупности всех частичных погрешностей можно получить конечную погрешность измерений относительных значений индукции λ по схеме, показанной на рис. 1 в пределах

$$\Delta_{\lambda} = 0,1 - 0,5 \%$$

6. Погрешности при измерении градиента магнитного поля

Из рассуждений, проведенных в гл. 2 и 3, следует, что при измерении градиента магнитного поля по схеме (рис. 1) измерение тока возбуждения датчика не влияет на точность измерений. Этот метод также исключает влияние временной нестабильности магнитного поля.

Далее рассмотрим влияние точности измерения напряжений Холла, влияние температурной зависимости датчиков, а также точности их установки на точность измерения градиента. При этом будем также предполагать, что относительные изменения напряжения Δ_U вносят погрешность при определении индукции в линейной зависимости. Отдельные частичные погрешности рассчитаем как относительную погрешность

$$\Delta_I = \frac{I_0 - \Gamma}{I_0} = 1 - \frac{\Gamma}{I_0} \quad (6.1)$$

Точность измерений отдельных напряжений Холла U_1, U_2, U_V , выраженная погрешностью измерений напряжений $\Delta U_1, \Delta U_2, \Delta U_V$, влияет на Δ_I следующим образом:

$$\frac{\Gamma_U}{I_0} = \frac{(B_1 - B_2) \frac{1}{B_V}}{(B_{10} - B_{20}) \frac{1}{B_{V0}}} = \frac{[B_{10}(1 + \Delta U_1) - B_{20}(1 + \Delta U_2)] \frac{1}{B_{V0}(1 + \Delta U_V)}}{(B_{10} - B_{20}) \frac{1}{B_{V0}}}$$

где B_{10}, B_{20}, B_{V0} — точные значения индукции

B_1, B_2, B_V значения индукции, определенные при измерении.

После упорядочения получаем

$$\Delta_{\Gamma_U} = \frac{B_{20}(\Delta U_2 - \Delta U_V) - B(\Delta U_1 - \Delta U_V)}{(B_{10} - B_{20})(1 + \Delta U_V)} \quad (6.2)$$

Так как $\Delta U_V \ll 1$, в знаменателе уравнения (6.2) пренебрегаем ΔU_V , тогда

$$\Delta_{I_U} = \frac{B_{20}\Delta U_2 - B_{10}\Delta U_1}{B_{10} - B_{20}} + \Delta U_V \quad (6.3)$$

По формуле (6.3) рассчитаем погрешность для случая $B_{10} = 6600$ гаусс, $B_{20} = 6000$ гаусс, $\Delta U_1 = 0,02\%$, $\Delta U_2 = -0,02\%$, $\Delta U_V = -0,02\%$. Получаем $\Delta_{I_U} = -0,4\%$.

Температурная зависимость датчиков Холла вносит относительную погрешность

$$\Delta_{\Gamma_T} = \frac{a_{H2}\Delta T_2 \frac{B_{20}}{B_{10}} - a_{H1}\Delta T_1 \frac{B_{10}}{B_{10}} - a_{HV}\Delta T_V \frac{(B_{20} - B_{10})}{B_{10} - B_{20}}}{B_{10} - B_{20}} \quad (6.4)$$

Если датчики 1, 2 находятся при одинаковой температуре, т.е. $\Delta T_1 = \Delta T_2 = \Delta T$, но отличающейся от температуры относительного датчика, для Δ_{Γ_T} имеем:

$$\Delta_{I_{\Gamma T}} = \frac{(a_{H2} B_{20} - a_{H1} B_{10}) \Delta T + a_{HV} \Delta T_V (B_{10} - B_{20})}{B_{10} - B_{20}} \quad (6.5)$$

Если датчики 1, 2 работают при температуре градуировки, отличающейся от температуры относительного датчика, то

$$\Delta_{I_T} = a_{HV} \Delta \Gamma_V \quad (6.6)$$

Так как датчики 1, 2 находятся в общем футляре, то они имеют одинаковую температуру, отличающуюся обычно от температуры градуировки. Разберем случай, когда $\Delta T = 3^\circ\text{C}$, $\Delta T_V = 5^\circ\text{C}$, $a_{H1} = a_{HV} = -0,08\%/^\circ\text{C}$, $a_{H2} = -0,7\%/^\circ\text{C}$, $B_1 = 600$ гаусс, $B_2 = 0$. Получаем относительную погрешность $\Delta_{I_T} = -0,16\%$. Если $B_1 = 6600, B_2 = 6000$ гаусс и остальные данные не менялись, то получаем $\Delta_{I_T} = +0,16\%$.

Влияние неточности установки датчика по отношению к полю при измерениях градиента следующее.

Предполагаем, что перпендикуляр к датчику NS_1 отклоняется от вектора индукции на угол β_1 , к датчику NS_2 - на угол β_2 . Так как датчик NS_{Σ} относительный и его установка в поле неизменна, то он на точность определения градиента не влияет. Погрешность, вызванная отклонением β_1, β_2 ,

$$\Delta_{\Gamma\beta} = 1 - \frac{\Gamma\beta}{\Gamma_0} = 1 - \frac{B_{10} \cos \beta_1 - B_{20} \cos \beta_2}{B_{10} - B_{20}} \quad (6.7)$$

Рассмотрим случай: $\Gamma_0 = 500$ гаусс/см, $B_{10} = 8500$ гаусс, $\beta_1 = 0,5^\circ$, $\beta_2 = 1,5^\circ$, погрешность будет $\Delta_{\Gamma\beta} = 0,38\%$. Если оба датчика имеют одинаковые отклонения относительно поля, то погрешность равна

$$\Delta_{\Gamma\beta} = 1 - \cos \beta \quad (6.8)$$

т.е. при $\beta = 0,5^\circ$ $\Delta_{\Gamma\beta} = 0,004\%$; при $\beta = 1,5^\circ$ $\Delta_{\Gamma\beta} = 0,03\%$. Очевидно, что теперь погрешность значительно меньше, чем в предыдущем случае, когда отклонения датчиков были различными. Поэтому при измерении следует крепить оба датчика на общем ровном основании близко между собой.

Типичным оборудованием, где требуется измерение градиента, являются магнитные квадрупольные линзы. Распределение градиента обычно измеряется в главной плоскости линзы. Подробный разбор ошибок при определении градиента в главной плоскости квадрупольного поля вследствие неправильной установки датчиков дает

$$\Delta_{\Gamma\beta\lambda} = 1 - \frac{B_{10} \frac{\cos \omega_1}{\cos \gamma_1} - B_{20} \frac{\cos \omega_2}{\cos \gamma_2}}{B_{10} - B_{20}} \quad (6.9)$$

причем значение отдельных величин видно из рис. 3.

В конкретном случае квадрупольного поля датчик 1 установлен в поле $B_1 = 5000$ гаусс и его расстояние от середины линзы $r_1 = 100$ мм. Датчик 2 находится в поле $B_2 = 5500$ гаусс на расстоянии от середины линзы $r_2 = 110$ мм. На рис. 2 расстояние плоскости ρ от середины линзы $a = 0,5$ мм, угол $\beta = 0,5^\circ$, $\delta_1 = 1^\circ$, $\delta_2 = 0,5^\circ$. Из уравнения (6.9) получаем погрешность

$$\Delta_{\Gamma\beta\lambda} = 0,88 \%$$

Из вышесказанного очевидно, что погрешность определения градиента в главной плоскости квадрупольной линзы в сильной степени зависит от правильности установки датчика в главной плоскости и от перпендикулярности установки его относительно направления поля.

Пользуясь специальными методами для отсчета значений B_1, B_2, B_{Σ} по кривой градуировки, включая ошибку градуировки, погрешность отсчета можно ограничить 0,05-0,1 %.

Учитывая все вышеуказанные частичные погрешности, при помощи датчиков Холла, включенных так, как показано на рис. 1, можно определить градиент магнитного поля, нестабильного во времени, с точностью

$$\Delta \Gamma = 0,6 - 1,0 \%$$

7. Практическое применение схемы

Предложенная схема была использована для измерений на больших магнитах постоянного тока советского производства типа СП-12, СП-40, СП-100 и на магнитных линзах типа МЛ-16, МЛ-17, предназначенных для антипротонного канала 5 Бэв. Кроме других измерений требовалось исследовать распределение магнитного поля в средней плоскости воздушного зазора магнитов и распределения градиента в главных плоскостях квадрупольных магнитных линз.

При топографировании поля в магнитах мы включили последовательно четыре датчика Холла марки Siemens, тип JS-24, что дало возможность измерять значения индукции в трех точках одновременно. При измерении градиента было включено последовательно три датчика чехословацкого производства типа SAV-S2. Оба типа датчиков изготовлены из мышьяковистого индия и имеют чувствительность 10 мкв/гаусс при питающем токе 100 ма. Были выбраны датчики с малыми температурными коэффициентами и малым напряжением шумов. Выбранные датчики были отградуированы на месте измерения. Градуировка производилась методом протонного резонанса по прибору ИМИ-2, который при использовании прецизионного лабораторного волномера и при однородностях поля меньших, чем $0,2\%$ на 1 см^2 , позволяет произвести градуировку с точностью $0,01\%$.

В период измерений проверялась температура датчиков термомпарами, установленными в футлярах датчиков. Напряжения датчиков Холла и питающий ток датчиков измерялись с помощью потенциометров постоянного тока типа УПЛ-60-2 и типа QLK-METRA (чехословацкого производства) с классом точности $0,02\%$. Преимущества этой схемы состоят в том, что нет необходимости внимательно следить за стабилизацией магнитного поля и точно устанавливать постоянный ток питания датчиков. Кроме того имеется возможность проводить измерения в нескольких точках одновременно, что очень важно при вышеуказанных длительных измерениях, при которых снималось несколько тысяч точек. Для иллюстрации приведем несколько конкретных результатов измерений. На рис. 4 изображена кривая распределения магнитного поля в поперечном сечении магнита типа СП-100, на рис. 5 - кривая распределения градиента в поперечном сечении квадрупольной линзы МЛ-17 и на рис. 6 - кривая распределения градиента вдоль той же линзы. Более подробные результаты измерений на магнитах СП-12, СП-100 и линзах МЛ-16, МЛ-17 приведены в работе ^{15/}.

8. Заключение

Мы показали, что если измеряется индукция (порядка 100 гаусс и более) в одной точке при помощи одного датчика Холла, то точность измерения составляет 0,1-0,5%, но если производится топографирование поля постепенным измерением индукции в различных точках поля, то точность топографирования в сильной степени зависит от точности стабилизации магнитного поля и от временной стабилизации тока питания датчика. Например, при стабилизации с точностью 10^{-2} точность топографирования понижается до 1-1,5%, и измерение градиента по этой схеме имело бы (в крайнем случае) двойную ошибку. Поэтому мы предложили схему (рис. 1), которая исключает влияние временной нестабильности поля и колебаний тока питания датчиков на точность измерений. Из сделанного разбора погрешностей измерений по этой схеме следует, что топографирование можно производить с точностью до 0,1-0,5% и измерение градиента - с точностью до 0,6-1%. Схема была проверена при длительных измерениях на больших магнитах и на магнитных линзах.

Л и т е р а т у р а

1. А.П. Пинскер, Применение полупроводниковых генераторов Холла в автоматике, ГИТЛ, Киев 1961г.
2. В.Н. Богомолов, Устройства с датчиками Холла и датчиками магнитосопротивления. ГЭИ, МЛ 1961г.
3. A.Kobus, J.Tuszynski, Hallotrony i ich zastosowanie. Warszawa 1963.
4. C.Geman, Bibliographical Review of the Methods of Measuring Magnetic Fields, Nuclear Instruments and Methods, 21, 17-46 (1963).
5. J.Betko, M.Polak, I.Puzjak, a kol Magneticke merania na zariadeniach antiprotonoveho kanala 5 BeV. Zprava EU SAV, Bratislava, CSSR.

Рукопись поступила в издательский отдел
25 мая 1964 г.

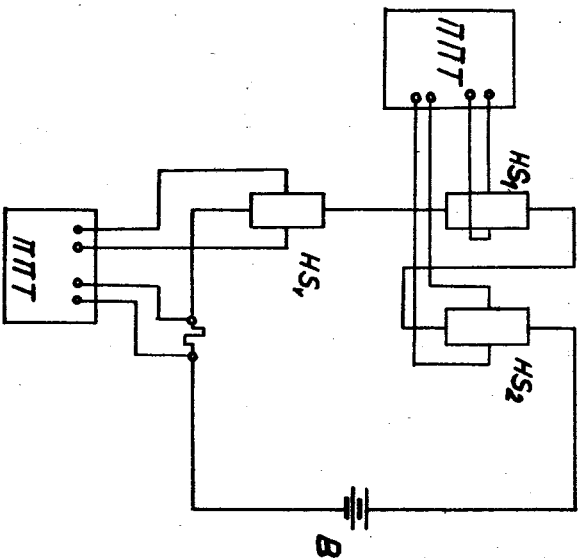


FIG. 1.

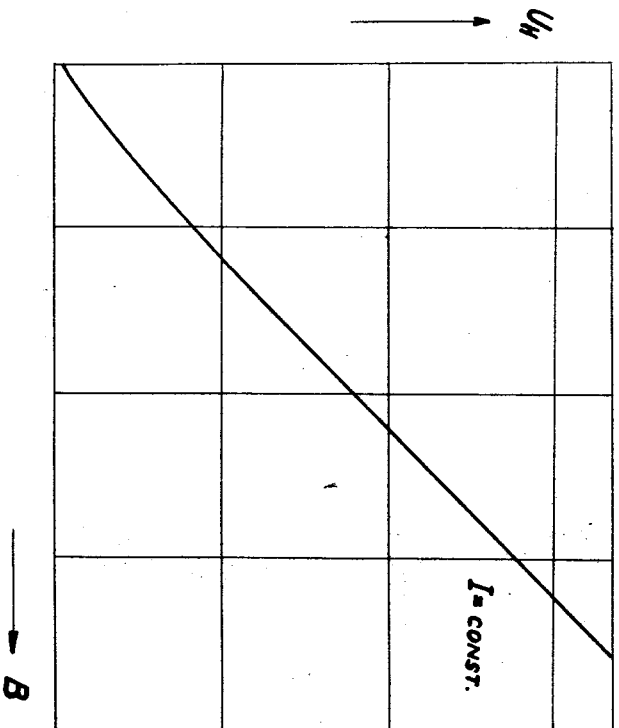


FIG. 2.

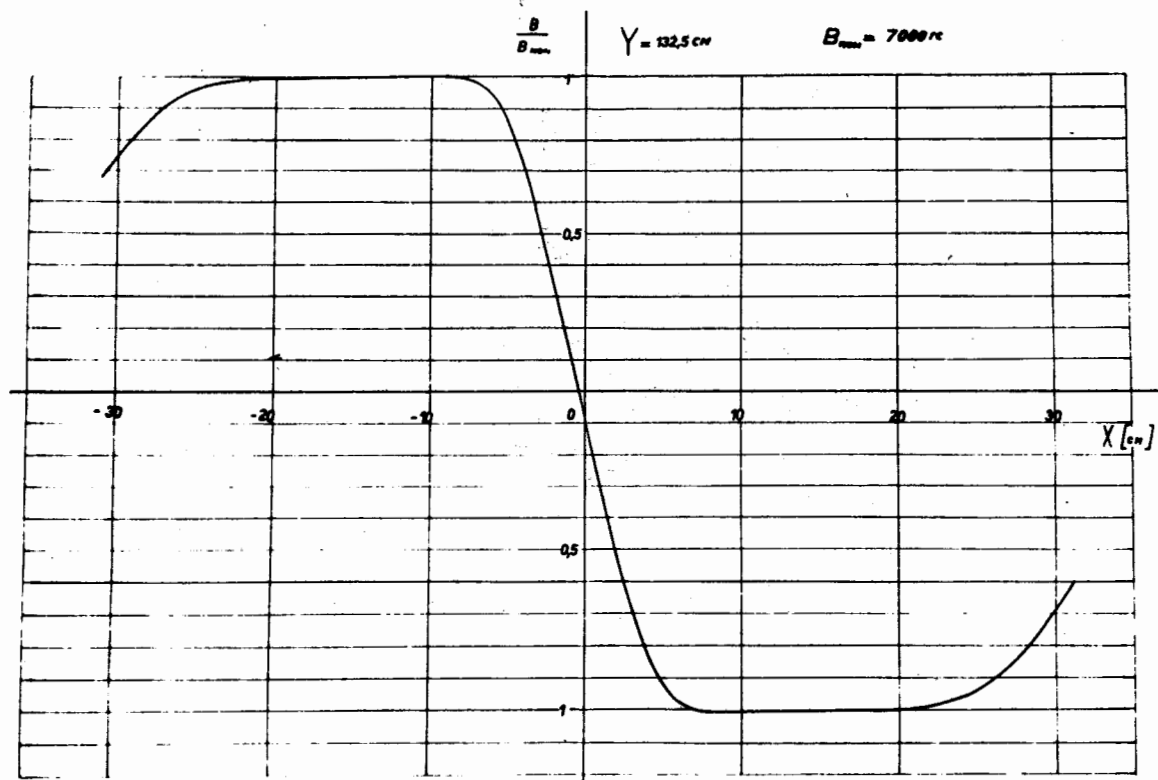


Рис. 4.

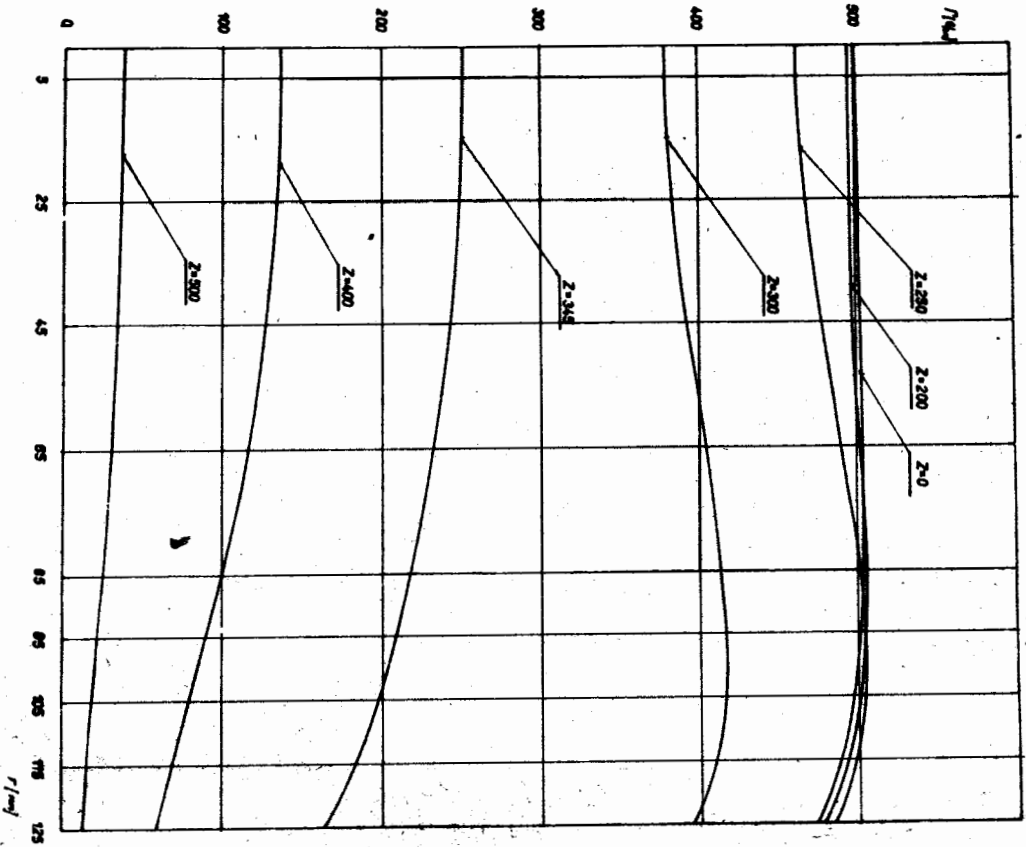


FIG. 5.

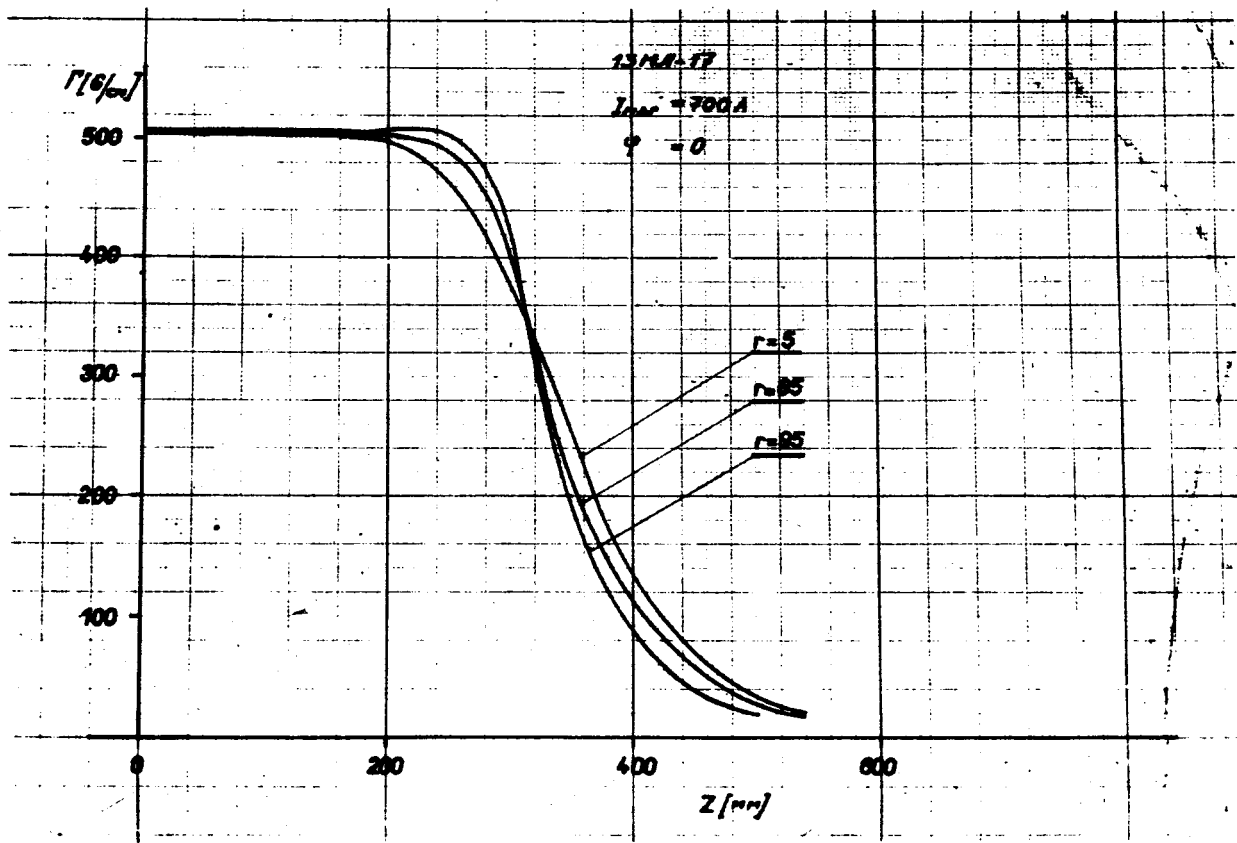


Рис. 6.