

Д-302

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

Р - 2818



Е.А. Дементьев, И.Б. Иссянский, Е.М. Кулакова,  
К.П. Мызников, М. Полак,<sup>х/</sup>Ф. Хованец<sup>х/</sup>

ИЗМЕРЕНИЕ ТОПОГРАФИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ  
СИНХРОФАЗОТРОНА ОИЯИ  
ДАТЧИКАМИ ХОЛЛА

ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

1966

P - 2818

Е.А. Дементьев, И.Б. Иссянский, Е.М. Кулакова,  
К.П. Мызников, М. Полак<sup>x/</sup>, Ф. Хованец<sup>x/</sup>

ИЗМЕРЕНИЕ ТОПОГРАФИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ  
СИНХРОФАЗОТРОНА ОИЯИ  
ДАТЧИКАМИ ХОЛЛА



<sup>x/</sup> Сотрудники Электротехнического института Словацкой АН.

4440/2 чф.

Цель настоящей работы состояла в измерении относительного распределения вертикальной компоненты  $B_z$  переменного магнитного поля синхрофазотрона ОИЯИ в средней геометрической плоскости при индукции 12300 гаусс с точностью не хуже  $\pm 0,3\%$ . Измерения производились с помощью датчиков Холла в конце III квадранта ускорителя в рабочей области и в области рассеянных полей. Эта область представляет интерес в связи с расчетами траекторий заряженных частиц в поле синхрофазотрона при выводе вторичных и первичных пучков.

### 1. Метод измерений

Датчики Холла (в дальнейшем ДХ) успешно используются для измерения постоянных магнитных полей<sup>1,2/</sup>. В работе<sup>2/</sup>, выполненной в Электротехническом институте Словацкой АН, был разработан метод измерения относительного распределения переменного магнитного поля с помощью двух ДХ, один из которых является мониторинным. Для запоминания напряжения, генерируемого ДХ в переменном магнитном поле, был использован конденсатор. При разработке методики измерений поля синхрофазотрона ОИЯИ этот метод был изменен применительно к конкретным условиям работы. В связи с большим объемом измерений была увеличена скорость измерений без ухудшения их точности. Для этого относительные измерения поля проводились только одним ДХ, а мониторинг производился с помощью импульса, привязанного к заданному значению поля с точностью  $\approx 2 \cdot 10^{-2\% / 4/}$ , что упрощает измерения и увеличивает их скорость. Электрическая схема включения ДХ показана на рис. 1. Пусть ДХ находится в некоторой точке  $x$  магнитного зазора. При изменении поля во времени э.д.с. ДХ изменяется пропорционально индукции, при этом в отсутствие нагрузки это напряжение можно выразить следующим образом:

$$U(x, t) = K(B, T) \cdot I \cdot B(x, t) \cdot \cos \theta, \quad (1)$$

где  $K(B, T)$  – постоянная датчика для данного материала и определенных размеров, которая зависит от индукции магнитного поля  $B$  и температуры  $T$ ;  $I$  – ток датчика;  $\theta$  – угол между направлением  $\vec{B}$  и нормалью  $\vec{n}$  к плоскости ДХ (рис.3);  $B(x, t)$  – индукция магнитного поля, зависящая от точки измерения  $x$  и времени  $t$ .

Если поддерживать  $I$  и  $T$  постоянными, то для  $\theta = 0$  (1) можно записать в форме:

$$B(x, t) = K_I(B) U(x, t). \quad (1a)$$

Зависимость  $K_I(B) = f(U)$  получается путем градуировки ДХ в постоянном поле. Таким образом, задача измерения величины  $B(x, t)$  сводится к измерению  $U(x, t)$ . При нарастании поля конденсатор  $C$  (рис. 1), параллельно которому включен цифровой вольтметр ЦВ, через контакты реле  $P$  заряжается до напряжения  $U_0(x, t)$ . Если в момент времени, когда поле в мониторинной точке достигает заданного значения, разомкнуть реле, то на конденсаторе остается напряжение, близкое напряжению на ДХ в момент размыкания. После этого производится измерение напряжения на конденсаторе  $U_0$ .

На рис. 2 представлена диаграмма, иллюстрирующая процессы изменения во времени магнитного поля синхрофазотрона ( $B$ ), напряжения на ДХ ( $U$ ) и конденсаторе ( $U_0$ ).

Соответствующим выбором сопротивления ДХ между точками 3 и 4 (рис. 3), входного сопротивления цифрового вольтметра и величины емкости  $C$  можно добиться того, что напряжение  $U_0$  в течение времени измерения будет мало отличаться от э.д.с. ДХ в момент размыкания реле.

Следовательно, если реле размыкает цепь в момент времени  $t_M$ , который точно связан с достижением определенной величины магнитного поля  $B(M, t_M)$  в мониторинной точке, то относительную величину поля в данной точке  $x$  можно определить:

$$\frac{B(x, t_M)}{B(M, t_M)} = \frac{K_I(B_x) \cdot U(x, t_M)}{K_I(B_M) \cdot U(M, t_M)}. \quad (2)$$

$U(M, t_M)$  является величиной, связанной с выбранным значением магнитного поля в мониторинной точке,  $U(x, t_M)$  – значение напряжения в измеряемой точке в момент, когда индукция в мониторинной точке достигает значения  $B(M, t_M)$ .

В нашем случае реле было включено в цепь ждущего мультивибратора (рис. 1 и 8), запускаемого импульсом  $U_3$  (рис. 2), привязанным к абсолютному значению маг-

нитного поля в некоторой мониторинной точке М. Эта привязка к переменному магнитному полю производилась с помощью витка связи, проложенного на полюсах магнита, и интегрирующего устройства, которое давало импульс, связанный с усредненной по зазору ускорителя величиной поля  $^{1/4}$ . Предварительными измерениями по схеме рис. 1 было определено, что показания ДХ, расположенного в точке М (принятой за начало координат, рис. 10), воспроизводятся с высокой точностью. Среднеквадратичная ошибка при пяти измерениях в этой точке составляла  $\pm 0,02\%$ . Отсюда следует, что мониторинный импульс с достаточной степенью точности связан с индукцией в точке, принятой за мониторинную. Длительные временные уходы в мониторинной точке исключались с помощью т.н. опорной кривой (см. раздел 5. Измерения и обработка результатов). Поэтому в дальнейшем считалось, что мониторинный импульс с достаточной степенью точности связан с индукцией в точке, принятой за мониторинную.

## 2. Анализ работы схемы

### а) Датчик Холла

В постоянном магнитном поле индукции В на электродах 3-4 ДХ (рис. 3) возникает напряжение:

$$U_H = G(a/b, S/a, \phi) \frac{1}{d} R_x(B, T) V I \cos \theta + U_{II} \quad (3)$$

где  $G(a/b, S/a, \phi)$  - геометрический фактор,  
 $\phi$  - угол Холла,  $^{1/5}$ ,  
 $d$  - толщина пластинки ДХ,  
 $R_x$  - постоянная Холла,  
 $U_{II}$  - напряжение помех.

Предположим теперь, что ДХ помещен в переменное магнитное поле, линейно изменяющееся во времени:

$$B = \dot{B} t, \quad (4)$$

где  $\dot{B} = \frac{dB}{dt}$  - скорость нарастания поля во времени. Напряжение между электродами 3-4 будет:

$$U = K(B, T) I (B, A_1, \dot{B}) \cdot V(x, t) \cos \theta + U_1(A_2, \dot{B}) + U_{II} \quad (5)$$

где  $K(B, T) = G(a/b, S/a, \phi) \frac{1}{d} \cdot R_x(B, T)$ .

Здесь  $U_1(A_2, \dot{B})$  - э.д.с. индукции, возникающая за счет изменения магнитного потока в цепи напряжения ДХ и зависящая от  $\dot{B}$ ;  $A_1$  - площадь токовой цепи датчика,

находящейся в переменном поле;  $A_2$  - площадь кепи напряжения в той же области.

Отношение между напряжением в переменном и постоянном полях будет:

$$\delta = \frac{U}{U_H} . \quad (6)$$

Для того чтобы можно было пользоваться калибровочной кривой, снятой в постоянном поле, величина  $\delta$  должна быть достаточно близка к единице. С этой целью питание токовой цепи ДХ производилось с помощью электронного стабилизатора тока, а ДХ были смонтированы таким образом, чтобы  $A_1$  и  $A_2$  были минимальны. В результате отличие  $\delta$  от 1 для  $\dot{B} = 4$  кгс/сек не превышало 0,05%.

#### б) Схема измерения

Напряжение, которое показывает цифровой вольтметр в замкнутом и разомкнутом состояниях реле можно вычислить, используя схему рис. 4, где  $U(t)$  - напряжение на ДХ;  $R_1$  - сопротивление датчика в цепи Холла;  $C$  - емкость;  $U_0(t)$  - напряжение на емкости;  $R_2$  - входное сопротивление цифрового вольтметра;  $U_b(t)$  - напряжение на цифровом вольтметре;  $P$  - реле.

Во время отсчета  $t_2$  (рис. 2 и 5) напряжение  $U_b(t_2)$  можно выразить следующим образом:

$$U_b(t_2) = \left[ \frac{Et_1}{\alpha} + \frac{ER_1C}{\alpha^2} \left( \alpha - \frac{t_1\alpha}{R_1C} - 1 \right) \right] e^{-\frac{t_2-t_1}{R_2C}} + U_0 , \quad (7)$$

где  $\alpha = 1 + R_1/R_2$ ;

$t_M$  - время прихода мониторингового запускающего импульса;

$t_0$  - инерция реле;  $t_1$  - время замыкания реле ( $t_1 = t_M + t_0$ );

$t_2$  - начало отсчета цифрового вольтметра;  $U_0$  - напряжение ДХ в отсутствие поля;  $E = \frac{\dot{B}}{K_1(B)}$ .

При этом можно считать, что после цикла размагничивания эффект остаточного поля пренебрежимо мал. Формула (7) дает возможность оценить разницу в величине напряжения, регистрируемого цифровым вольтметром и э.д.с. ДХ в зависимости от параметров схемы, а также осуществить выбор этих параметров для уменьшения ошибки измерения (см. раздел 4. Оценка ошибок измерения). С точки зрения надежности работы ДХ интересно также оценить ток в цепи напряжения ДХ, возникающий при зарядке емкости  $C$ . Из уравнения (7) следует:

$$i(t) = \frac{EC}{\alpha} \left( 1 - e^{-\frac{t_1\alpha}{R_1C}} \right) + \frac{U_0}{R_2} . \quad (8)$$

При выбранных нами параметрах этот ток был порядка 1 мка, что не представляло опасности для ДХ при долговременной его работе.

### 3. Аппаратура

#### Приспособление для перемещения ДХ

Для перемещения ДХ в магнитном поле ускорителя с точностью  $\pm 1$  мм было изготовлено два приспособления. Приспособление № 1 было предназначено для перемещения ДХ в средней геометрической плоскости ускорителя внутри вакуумной камеры. Приспособление № 2 – для измерений в области рассеянных полей между наружной стенкой вакуумной камеры и ярмом магнита. Конструктивно каждое приспособление представляло собой плоскую раму с независимым перемещением ДХ по взаимно перпендикулярным осям X и Y (рис. 6). Азимутальные направляющие (1) (движение по оси X) являлись одновременно основанием приспособления, каретка с направляющими (2) служила для перемещения ДХ в радиальном направлении (движение по оси Y). ДХ крепился с помощью удлинителя (4) к держателю (3). Перемещение в обоих направлениях можно было производить, находясь вне камеры, с помощью рукояток (7), связанных с кареткой немагнитными троссами. Отсчет положения производился по счетчикам с лямпами, которые были жестко связаны с осями рукояток. Один полный оборот рукоятки соответствовал перемещению ДХ на 100 мм по направлению X или Y. Поскольку камера ускорителя имеет значительную кривизну, то существуют области, в которых нельзя производить измерения без дополнительного удлинителя (4) (рис. 6). С помощью удлинителя, который можно было поворачивать на  $180^\circ$  вокруг вертикальной оси, приспособление позволяло производить измерения во всей интересующей нас области. Перед началом измерений приспособление № 1 собиралось внутри камеры ускорителя. В нулевом положении ( $X=0, Y=0$ ) центр ДХ был выставлен таким образом, что он совпадал с точкой пересечения оси 35-го окна и центрального радиуса ускорителя. Ось каретки (ось Y) была направлена по оси окна, за ось окна принята ось стыкового зазора между башмаками магнита. Точность привязки приспособления № 1 к камере  $\pm 0,5$  мм. В вертикальном направлении плоскость ДХ была установлена в средней геометрической плоскости зазора ускорителя также с точностью  $\pm 0,5$  мм. Была проведена проверка горизонтальности ДХ во всей измеряемой области с помощью микрометрического уровня. В результате проверки было установлено, что горизонтальность ДХ выдерживается с точностью  $\pm 1,5^\circ$ . Приспособление № 2 с помощью соответствующих стыковых узлов могло быть точно привязано к приспособлению № 1, как со стороны внутреннего, так и наружного ярма магнита. Область измерений, которую можно было охватить с помощью обоих приспособлений в цилиндрической системе координат ускорителя (центральный радиус  $R_0 = 2800$  см) сос-

тавляла по радиусу  $\pm 210$  см от  $R_0$  и по азимуту  $\approx 300$  см от оси 35 окна. Регулировка и проверка приспособлений производилась вне камеры. Конструкция обеспечивала идентичность сборки. Определение действительного положения ДХ производилось по счетчикам с точностью  $\pm 1$  мм. Общий вид приспособлений в магните ускорителя показан на рис. 7.

#### Стабилизатор тока

На рис. 8 приведена схема электронного стабилизатора тока на 100 ма, второй аналогичный стабилизатор имел пределы регулировки от 200 до 300 ма. Ток стабилизатора контролировался с помощью потенциометра ППТВ.

#### Мультивибратор

Схема ждущего мультивибратора показана на рис. 9, обмотка реле РП-4 включена в анодную цепь лампы  $L_2$ . Неоновая лампочка  $L_4$  сигнализировала момент прихода мониторного импульса.

### 4. Оценка ошибок измерения

Влияние отдельных факторов на величину  $U_H$  рассмотрено в работах<sup>1,2/</sup>, где показано, что постоянные поля свыше 200 гс можно измерять с точностью не хуже 0,1%. Рассмотрим погрешности, связанные с данным методом измерения переменных магнитных полей. Для уменьшения ошибки при измерении переменного напряжения на конденсаторе С требуется прибор с высокой точностью и большим входным сопротивлением. В нашем случае был использован цифровой вольтметр типа ВЕ 2116 с входным сопротивлением  $10^7$  ом, что при выбранной величине  $C=80$  мкф дает постоянную времени разрядки 600 сек. Так как схема цифрового вольтметра не позволяла автоматически синхронизировать включение измерения с приходом мониторного импульса, это делалось вручную нажатием соответствующего тумблера в момент вспышки сигнальной лампочки. При этом разброс во времени  $t_2$ , связанный с реакцией оператора, достигал  $\pm(0,2 \div 0,3)$  сек. Обращаясь к формуле (7), находим, что такой разброс приводит к ошибке в измеряемом напряжении до  $\pm 0,05\%$ . К этой величине следует также добавить погрешность за счет времени пересчета цифрового вольтметра, составлявшего 0,1 сек, что соответствует 0,02%. Постоянная времени цепи зарядки при внутреннем сопротивлении ДХ  $R_1 = 1,5$  ом имеет величину  $10^{-4}$  сек. Эта величина вносит пренебрежимо малую ошибку. Реле (РП-4) было отрегу-



ляровано таким образом, что время его срабатывания составляло 1 мсек. Разброс во времени срабатывания реле не превышал 0,1 мсек. Это дает ошибку менее 0,01%.

Датчик Холла во время измерений помещался в герметический пластмассовый контейнер с циркулирующей дистиллированной водой. Температура воды поддерживалась постоянной при помощи термостата в пределах  $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$ . Температурный коэффициент применявшегося нами ДХ ( $\text{InAs}$ ) составляет  $-0,06\%$  на  $1^{\circ}\text{C}$ . Таким образом, ошибка за счет изменения температуры не превышала  $\pm 0,012\%$ . Градуировка ДХ производилась с помощью ядерного магнитного резонанса и была выполнена с точностью  $\pm(0,03-0,05)\%$ . Погрешность в установке ДХ  $\pm 1$  мм за счет лифтов приспособления приводит к ошибке измерений  $\pm 0,002\%$  в области малых градиентов и до  $\pm 0,2\%$  в области больших градиентов. Кроме того, существует погрешность при установке плоскости ДХ по горизонтали в пределах  $\theta = \pm 1,5^{\circ}$ . При этом погрешность имеет величину  $\pm 0,03\%$ . В результате среднеквадратичная ошибка измерений абсолютной величины поля в области малых градиентов составляет  $\pm 0,12\%$  и в области больших градиентов ошибка достигает  $\pm 0,25\%$ . Перечисленные выше ошибки приведены в таблице 1. Как видно, основная неточность измерений обусловлена дефектами приспособлений.

#### 5. Измерения и обработка результатов

Измерения производились в следующем порядке: ДХ устанавливался на нужный радиус, и производились измерения при перемещении его в азимутальном направлении (по оси X) от 0 (ось 35 окна) до 300 см, затем ДХ возвращался в точку 0, где производились контрольные измерения; после этого ДХ перемещался в следующую точку по радиусу и производились измерения в том же порядке. В каждой точке делалось 3-5 отсчетов по цифровому вольтметру. Во время снятия одной кривой по азимуту дважды проверялась температура воды в термостате и ток датчика. Измерения производились при температуре  $(25 \pm 0,2)^{\circ}\text{C}$ . Ток ДХ для полей  $\theta \div 12$  кгс был 100 ма, ниже 6 кгс - 200 ма. При измерениях ДХ перемещался в одну сторону относительно нуля отсчета, чтобы по возможности исключить люфты приспособления. Поскольку в процессе измерений приходилось поворачивать удлинитель с ДХ на  $180^{\circ}$  и менять длину удлинителя, было необходимо учитывать ошибки, связанные с неточностью ориентации ДХ в горизонтальной плоскости. Для исключения такого рода ошибок была снята опорная кривая при неизменной ориентации ДХ по оси 35 окна ( $X = 0$ ) в области по R от  $+180$  см до  $-130$  см (рис. 11). Недостающие участки опорной кривой были сняты с помощью дополнительного приспособления, причем участки  $\pm (120 \div 150)$  см перекрывались. Измерения, сделанные при использовании разных приспособлений, в одних и тех же точках в основном совпадают с точностью  $\pm 0,07\%$ , и только в области по радиусу в окрестности точек  $\pm 120$  см разница

достигает  $\pm 0,17\%$ . Здесь поле имеет максимальный градиент по  $R \left( \frac{\partial B_z}{\partial R} = 1,6 \text{ \%}/\text{см} \right)$  и полученная разница обусловлена в основном люфтами приспособления.

Обработка результатов измерений производилась в следующем порядке. Были найдены средние значения напряжения ДХ в каждой измеренной точке, по этим значениям с помощью градуировочной кривой определялась величина поля. Все кривые, снятые по азимуту для каждого радиуса, нормировались с помощью опорной кривой, т.е. цифры каждой азимутальной кривой были разделены на коэффициент  $k = \frac{B_z(R,0)}{B_{z \text{ опорн}}(R,0)}$ , где

$B_z(R,0)$  - величина поля по азимутальной кривой при  $X = 0$ ;  $B_{z \text{ опорн}}(R,0)$  - величина поля по опорной кривой. Затем вычислялось значение поля в каждой измеренной точке в процентах по отношению к величине поля  $B_z(0,0)$  в мониторинговой точке ( $12300 \text{ гс}$ ). Нормировкой с помощью опорной кривой, кроме ошибок в ориентации ДХ, исключались также ошибки за счет временных уходов схемы в течение длительного времени, поскольку опорная кривая снималась за короткий промежуток времени.

Статистическая ошибка в любой точке при 3-5 измерениях составляла  $\pm 0,02\%$ . В результате среднеквадратичная ошибка относительного распределения поля, полученная из статистической ошибки в каждой точке, погрешности градуировки и ошибки, связанной с люфтами приспособления, составила в области малых градиентов  $\pm 0,1\%$  и в области больших градиентов  $\pm 0,3\%$ . Рис. 8 и 9 иллюстрируют кривые относительного распределения магнитного поля по X и Y. На основании полученных результатов была составлена карта относительного распределения поля (рис. 10) с шагом 10 см в прямоугольной системе координат XY. В тех точках пространства, где невозможно было сделать непосредственные измерения (например, в области стенок вакуумной камеры ускорителя), величина поля получена методом линейной и параболической интерполяции. Таким методом получены азимутальные кривые для  $Y = +100$  и  $+110$  см. В области, лежащей по азимуту за пределами приспособлений ( $X > 300$  см), где поле  $\sim 3\%$  и хорошо описывается линейным законом, недостающие точки получены линейной экстраполяцией поля до 0.

### 6. Заключение

В заключение авторы приносят свою благодарность И.Н. Семенюшкину и И. Гласнику за весьма полезные обсуждения; Н.Г. Борису за содействие при конструировании приспособления; И.Н. Яловому, принявшему участие в измерениях. Авторы благодарят также В.А. Шурховецкого, В.Ф. Сухомлинова, Ю.Ф. Кусагина, М.Д. Ершова, В.С. Миронова, А.И. Крюкова, Э.И. Обьезднова за участие в наладке аппаратуры и измерениях, М.Г. Нехаеву и Н.А. Филиппову, И.А. Золину, и И.И. Озерову за помощь в обработке результатов.

### Л и т е р а т у р а

1. Ю. Бетко, И. Гласник, М. Полак, И. Пузак. Разбор одной схемы для магнитных измерений при помощи датчиков Холла. Препринт ОИЯИ, Р-1989, Дубна, 1964.

2. J. Betko, I. Hlasnik, M. Polak, I. Puziak. Vysetrenie Magnetickej Optiky Antiprotonoveho Kanala na 5 Bev Pomocou Hallovych Sond. Zaverena Zprava 1V-1/63 EU SAV, Bratislava.
3. М. Полак, Ф. Хованец. Электротехнический журнал Словацкой АН, том 17, 1966. (Elektr. CAS. SAV, 17, 1966).
4. А.Л. Мянц, С.М. Рубчинский, М.М. Вейсбейн, Ф.А. Водопьянов и др. Радиотехника и электроника, 1, 7, 910. (1956).
5. H.J. Lippmann, F. Kuhrt. Zeitschrift Naturforschung, 6, 13a (1958).

Рукопись поступила в издательский отдел  
30 июня 1966 г.

Таблица

Причина ошибки	Ошибка обусловлена	$\delta$ , значение
Нестабильность и неточность настройки тока	Схемой стабилизатора	$\pm 0,05$
Нестабильность поддержания температуры	Свойствами термостата (у нас $\pm 0,2^\circ\text{C}$ )	$\pm 0,012$
Неточность градуировки	Методом градуировки при использовании протонного резонанса	$\pm (0,03 \pm 0,05)$
Переменное поле. Изменение сопротивления ДХ в переменном поле.	Свойствами стабилизатора Индуктивными напряжениями	$\pm 0,05$
Неточность запускающего импульса	Привязкой к полю	$\pm 0,02$
Разброс во времени срабатывания реле	Свойствами реле (в нашем случае разброс $\Delta t_0 = 0,1$ мсек)	$< 0,01$
Ошибки, возникающие в цепи ёмкости	Зарядка Процессом зарядки	0
	Разрядка Неточность включения п. в. вручную	$\pm 0,05$
Неточность цифрового вольтметра	Временем пересчёта п. в.	$\pm 0,01$
	Вольтметром ВЕ 2116	$\pm (0,06 \pm 0,07)$
Погрешность при установке плоскости ДХ по горизонтали	Приспособлением	$< \pm 0,05$
Погрешность перемещения ДХ	Лифтами приспособления	$\pm (0,002 \pm 0,017)$

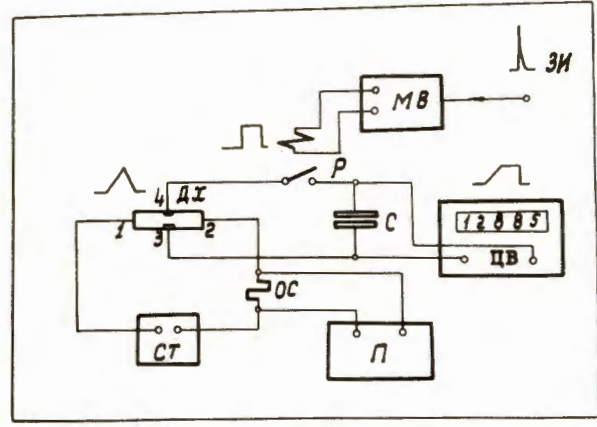


Рис. 1. Принципиальная схема измерений: ИЗ - запускающий импульс; МВ - мульти-вibrator; Р - реле; ДХ - датчик Холла; С - емкость; ЦВ - цифровой вольтметр; ОС - образцовое сопротивление; СТ - стабилизатор тока; П - потенциометр.

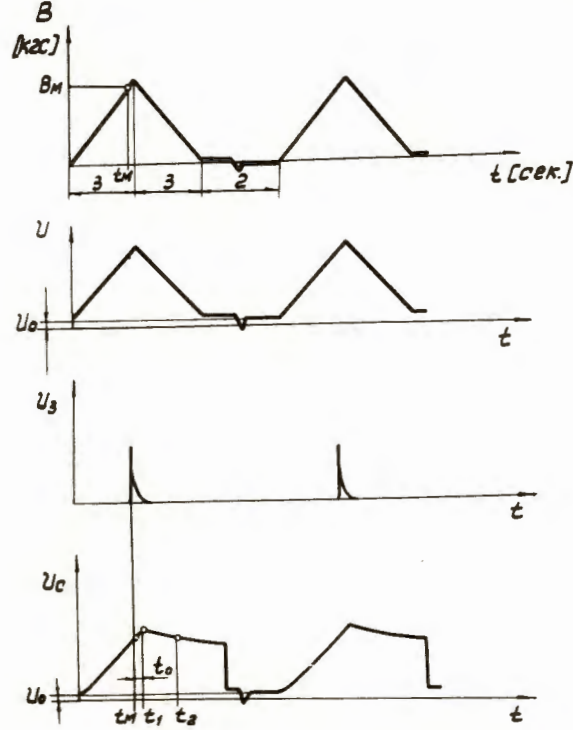


Рис. 2. Диаграмма временных процессов.

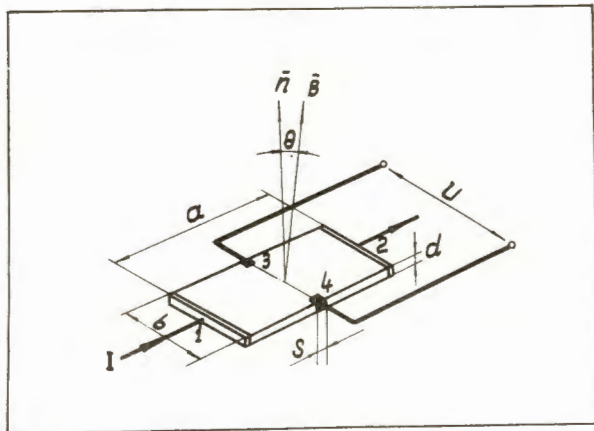


Рис. 3. Геометрия датчика Холла.

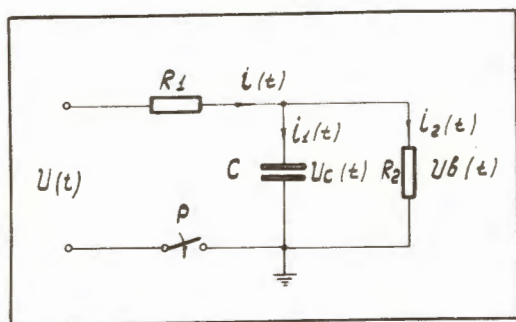


Рис. 4. Эквивалентная схема.

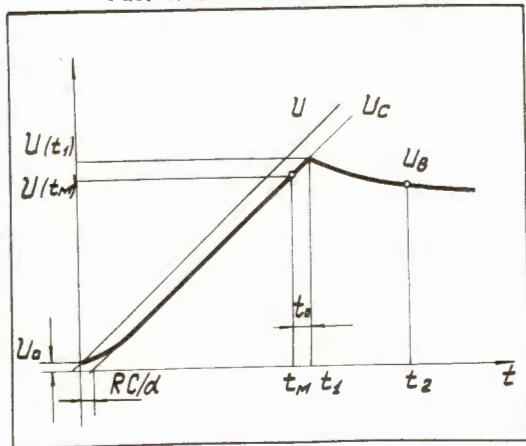


Рис. 5. Временная диаграмма напряжения на входе цифрового вольтметра.

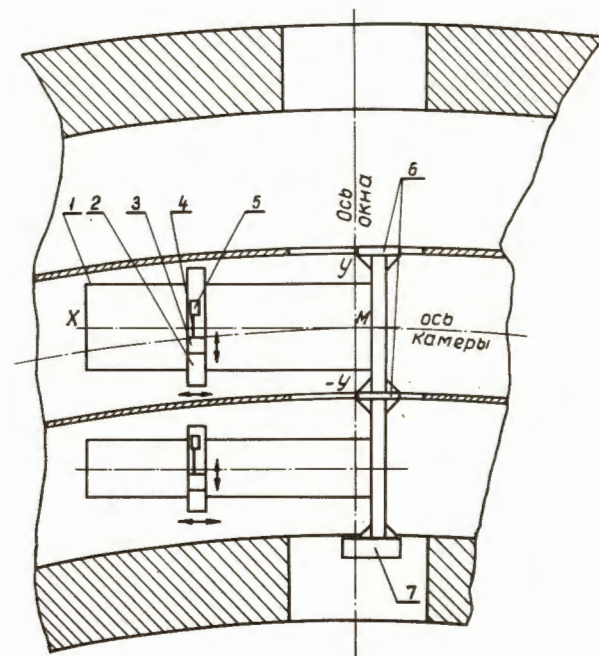


Рис. 6. Схема расположения приспособлений в магните ускорителя.



Рис. 7. Общий вид приспособлений в магните ускорителя.

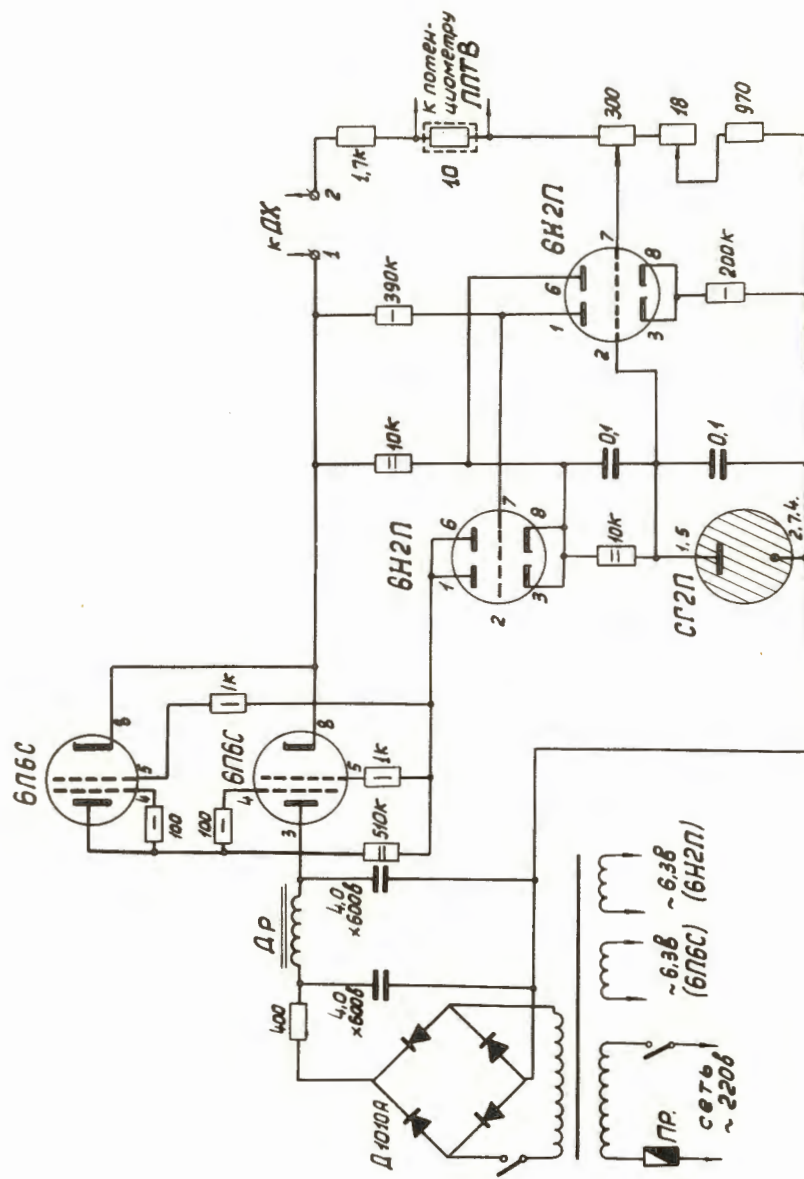


Рис. 8. Схема стабилизатора тока.

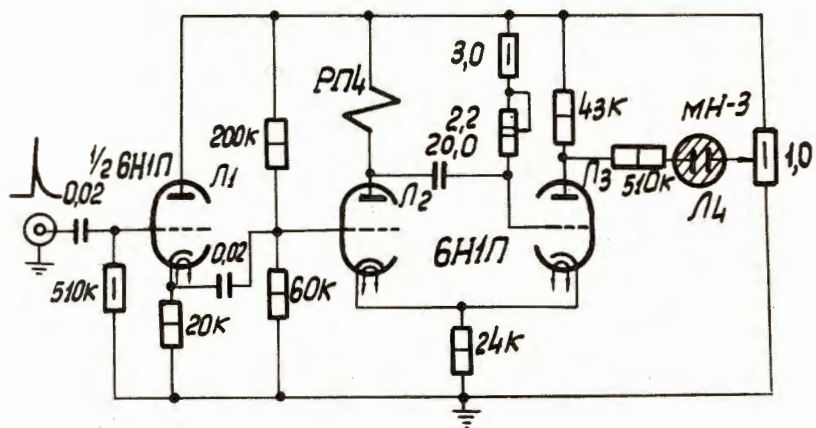


Рис. 8. Схема мультивибратора.

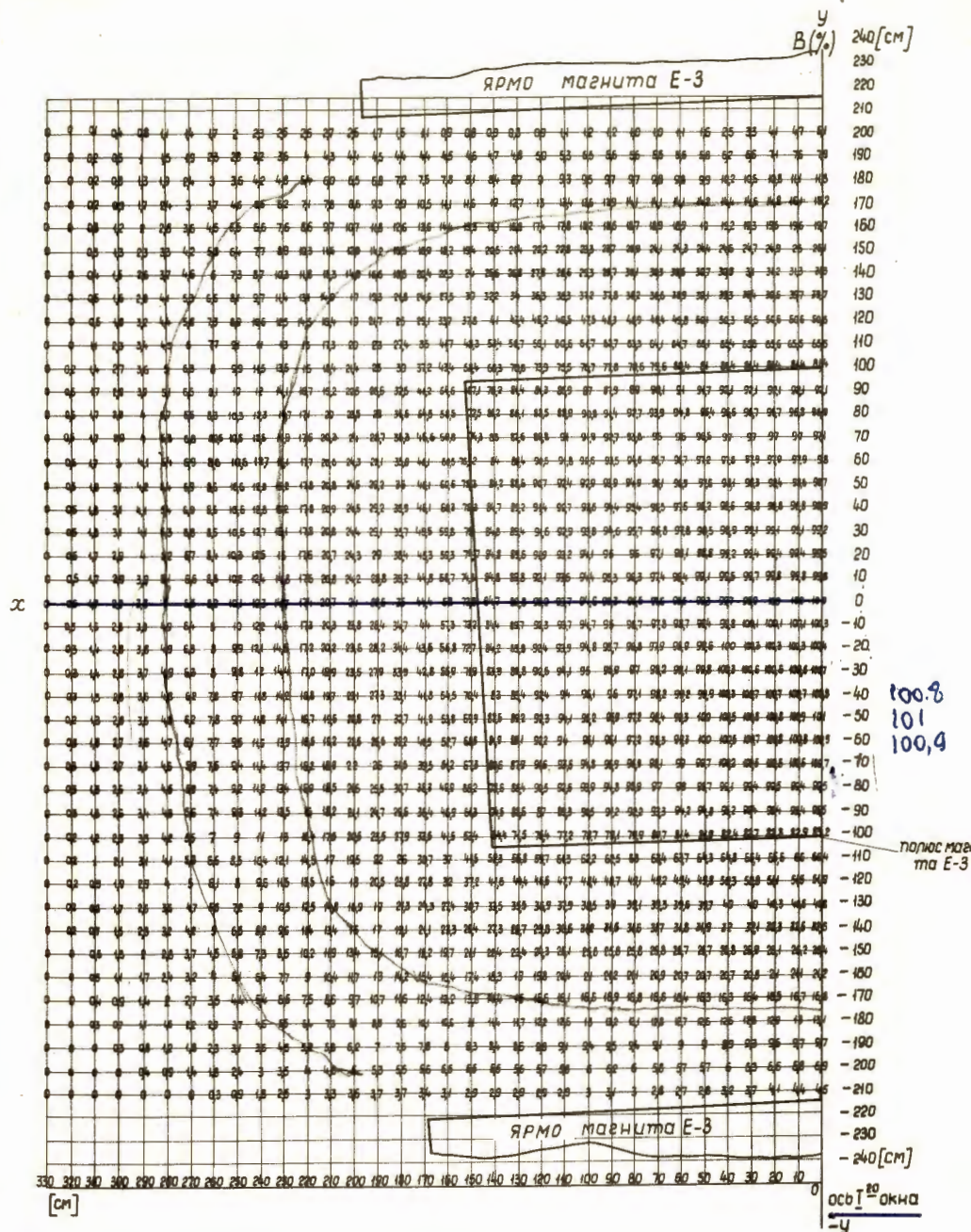


Рис. 10. Карта поля синхрофазотрона в конце III квадранта.

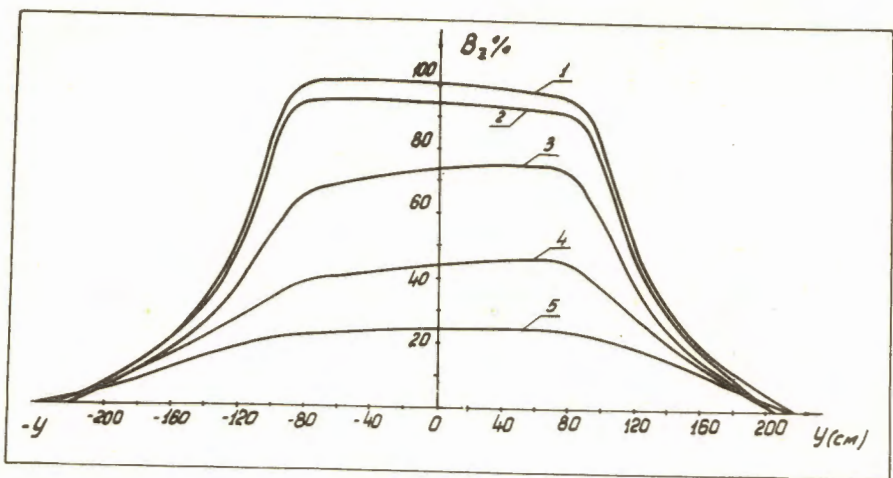


Рис. 11. Распределение поля по направлению  $y$  : 1-при  $X=0$  (опорная кривая); 2- при  $X = 100$  см; 3 - при  $X = 150$  см; 4 - при  $X = 170$  см; 5 - при  $X = 200$  см.

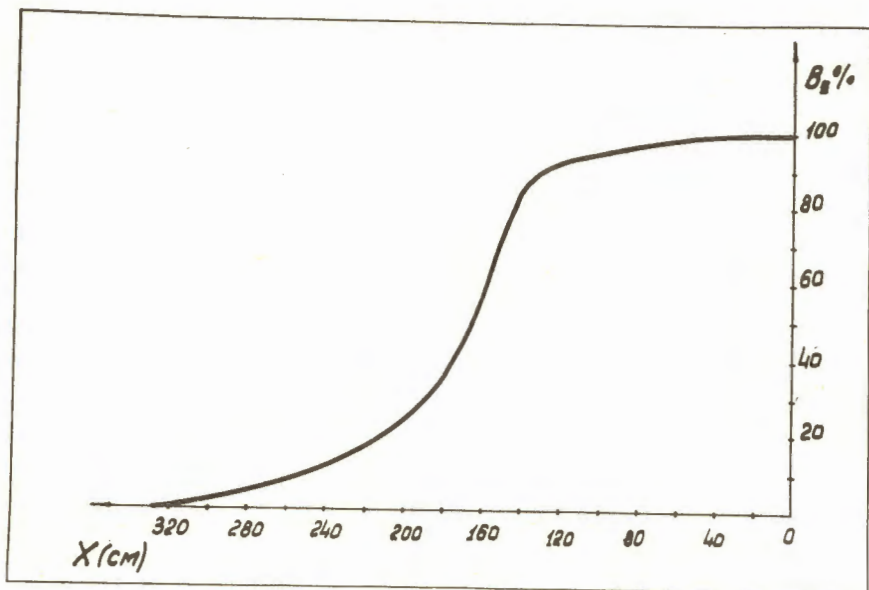


Рис. 12. Распределение поля по оси  $X$ .