

Б.43

22

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ  
СО АН СССР



В.С.Белкин, **Б.П.Санников**, В.Г.Соколов, И.Я.Тимошин

**ПРИБОР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ НАПРАВЛЕНИЙ  
МАГНИТНЫХ СИЛОВЫХ ЛИНИЙ**

*ПРЕПРИНТ 83-35*



НОВОСИБИРСК

#### А Н Н О Т А Ц И Я.

Описывается прибор для измерения углов наклона силовых линий магнитного поля, основанный на свойстве постоянного магнита ориентироваться по полю. Отклонение луча лазера, отраженного от зеркальца, связанного с магнитом, компенсируется с помощью следящей системы. Диапазон измерения поперечных составляющих поля  $0,015 \div 20$  Э, что позволяет измерять углы наклона силовых линий от  $5 \times 10^{-4}$  до  $0,8$  радиан при продольных полях  $20 \div 1000$  Э.

Для измерения формы приосевых силовых линий магнитного поля в плазменной установке «АМБАЛ» [1] был разработан прибор, основанный на свойстве магнитного момента постоянного магнита устанавливаться по направлению силовых линий магнитного поля. Схема прибора изображена на рис.1.

Постоянный магнит [1] из самарий-кобальтового сплава в виде цилиндра  $\varnothing 9 \times 8$  мм с внутренним отверстием  $\varnothing 5$  мм укреплен на карданном подвесе [2] и может свободно ориентироваться во всех направлениях. В отверстии магнита перпендикулярно его оси закреплено зеркальце [3], на которое падает лазерный луч. Поверхность зеркальца устанавливается перпендикулярно силовым линиям поля, в которое помещен прибор. Угол между отраженным и падающим лучами равен двойному углу наклона силовой линии к лазерному лучу. На удаленном экране [4] фиксируются координаты центра падения отраженного луча и по их значениям вычисляются углы наклона силовых линий.

На точность работы прибора влияют: трение и люфты в осях карданного подвеса, балансировка магнита в подвесе, перпендикулярность зеркальца к оси магнита, смещение магнитной оси от геометрической оси прибора.

Кольца карданного подвеса изготовлены из легкого сплава «электрон». Оси диаметром  $0,4$  мм из бериллиевой бронзы закреплены в подшипниках из фторопласта и опираются на часовые камни.

Балансировка магнита производилась так, чтобы ось магнита устанавливалась по направлению силовых линий земного поля, которое определялось с помощью хорошо сбалансированной магнитной стрелки. Магнит можно сбалансировать и так, чтобы вертикальная составляющая магнитного поля Земли была скомпенсирована силой тяжести и магнит устанавливался горизонтально. Это освобождает от учета вертикальной составляющей земного поля.

Для выставки зеркальца, установки магнитной оси по геометрической оси прибора, а также проверки его работоспособности он помещался в калибровочную катушку, где создавалось поле до  $400$  Э. При вращении прибора в катушке вокруг своей оси пятно на экране от отраженного луча в идеальном случае должно оставаться на месте. В действительности оно описывало круг радиусом  $3$  мм на экране, расположенном на расстоянии  $4,5$  м от прибора. Это говорит о том, что зеркальце выставлено перпендикулярно оси магнита с точностью  $\approx 3,5 \times 10^{-4}$  радиан. Этот угол можно при необходимости ввести для коррекции при измерениях.

Проверка смещения магнитной оси от геометрической проводилась следующим образом. Прибор смещался по оси катушки в область, где заметен поперечный градиент поля. Несовпадение осей должно привести к увеличению радиуса движения пятна на экране. Этого увеличения в пределах точности измерения замечено не было, что соответствует смещению осей менее 0,2 мм.

При уменьшении магнитного поля до  $15 \div 20$  Э начинают заметно сказываться механические дефекты. При вращении прибора «зайчик» начинает двигаться хаотично, с гораздо большими отклонениями и ошибка может достигать  $3 \times 10^{-3}$  радиан.

Предел чувствительности прибора и линейность отклонения луча в зависимости от величины поля проверялись в этой же катушке с помощью дополнительных боковых катушек, создающих поперечные поля. В пределах точности измерений ( $\sim 1\%$ ) линейность выдерживается. Предел чувствительности прибора составляет  $10^{-4}$  радиан при продольном поле 300 Э, что соответствует чувствительности по поперечному полю  $3 \times 10^{-2}$  Э.

Однако, в таком виде прибор обладал двумя недостатками: трудоемкостью обработки результатов измерений и невозможностью измерений больших углов наклона силовых линий вследствие ухода отраженного луча из апертуры установки ( $80 \times 80 \times 6000$  мм). Эти недостатки устранены введением следящей системы компенсации поперечных составляющих магнитного поля. Отраженный луч лазера падает на блок фотодиодов [5], расположенных концентрично с падающим лазерным лучом. Разность токов фотодиодов Д1, Д5, Д6 и Д2, Д7, Д8 является сигналом ошибки отклонения зеркальца по вертикали, аналогично фотодиоды Д3, Д9, Д10 и Д4, Д11, Д12 дают отклонение по горизонтали. Фотодиоды Д5 ÷ Д12 увеличивают зону захвата следящей системы. Сигналы с фотодиодов подаются на дифференциальные усилители обратной связи, выходы которых подключены к катушкам компенсации [6]. Значения токов в компенсирующих катушках пропорциональны поперечным составляющим магнитного поля. Таким образом, в данном случае измеряются не углы наклона силовых линий, а поперечные составляющие магнитного поля. Для вычисления углов необходимо знание величины продольного поля.

Принципиальная схема усилителей обратной связи системы компенсации приведена на рис.2. Схемы для компенсации вертикальных и горизонтальных отклонений одинаковы и независимы, поэтому их па-

раметры и особенности достаточно описать на примере одной из них. Выходной усилитель обеспечивает ток в катушках компенсации до  $\pm 300$  мА. Для подведения отраженного луча к зоне его захвата фотодиодной матрицей используются сопротивления R4 и R5 (ток «грубо» и ток «плавно»). При отключении фотодиодов переключателем П1 («ручной» — «автоматический») усилитель обратной связи превращается в двуполярный источник тока в компенсационные катушки, при этом возможна калибровка всей измерительной системы. Переключатели П2 и П3 («реверсы катушек») необходимы для обеспечения отрицательной обратной связи системы компенсации при любом направлении продольного магнитного поля. Переключатель П4 осуществляет смену катушек вертикального и горизонтального отклонения и удобен при калибровке и настройке прибора.

Постоянная времени обратной связи определяется цепью  $RC1 = 1 \text{ мОм} \times 75 \text{ мкФ} = 75 \text{ с}$ . Для подавления неустойчивостей следящей системы, которые могут быть вызваны LC резонансами катушек и механическими резонансами подвеса магнита введены дополнительные RC цепи: R2C2 и R3C3. Обход (компенсация) резонансов с целью расширения широкополосности системы невозможен, т.к. резонансная частота колебаний магнита зависит от величины продольного поля и составляет  $20 \div 100$  Гц в измеряемых полях. Время уравнивания системы определяется продольным полем и интенсивностью лазера. После подвода луча к краю фотодиодной площадки оно обычно не превышает 5 секунд и не слишком лимитирует скорость измерений. Устойчивость системы определяется петлевым коэффициентом усиления, в который входит интенсивность лазерного луча. Она легко устанавливается коллимированием лазера, поэтому дополнительных регулировок петлевого усиления не введено. Компенсирующие катушки ( $16 \times 20$  мм, 1000 витков проводом  $\varnothing 0,29$ ) укреплены на одном основании с карданным подвесом магнита и могут совместно с магнитом смещаться в радиальном направлении до  $\pm 7,0$  мм от оси. Последовательно соединенные 4 катушки при токе 300 мА создают поперечное поле в области магнита  $\sim 20$  Э. Относительная точность измерения поперечных составляющих поля  $\pm 1,5 \times 10^{-2}$  Э, погрешность калибровки прибора  $\pm 4 \times 10^{-2}$  Э.

При измерениях на установке «АМБАЛ» прибор устанавливался на каретку, которая могла передвигаться по направляющим. Первые измерения были проведены на отдельных узлах установки длиной 1,5

м вдоль их осей, в полях 500—1000 Э по углу отклонения лазерного луча, в дальнейшем была введена следящая система и измерения автоматизированы.

Авторы благодарят Г.И.Димова за постоянный интерес к работе и П.А.Журавлева, проводившего изготовление механической части прибора и внесшего ценные предложения по его конструкции.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Г.И.Димов, Г.В.Росляков. Ловушка с амбиполярными пробками. Препринт ИЯФ СО АН СССР 80—152.

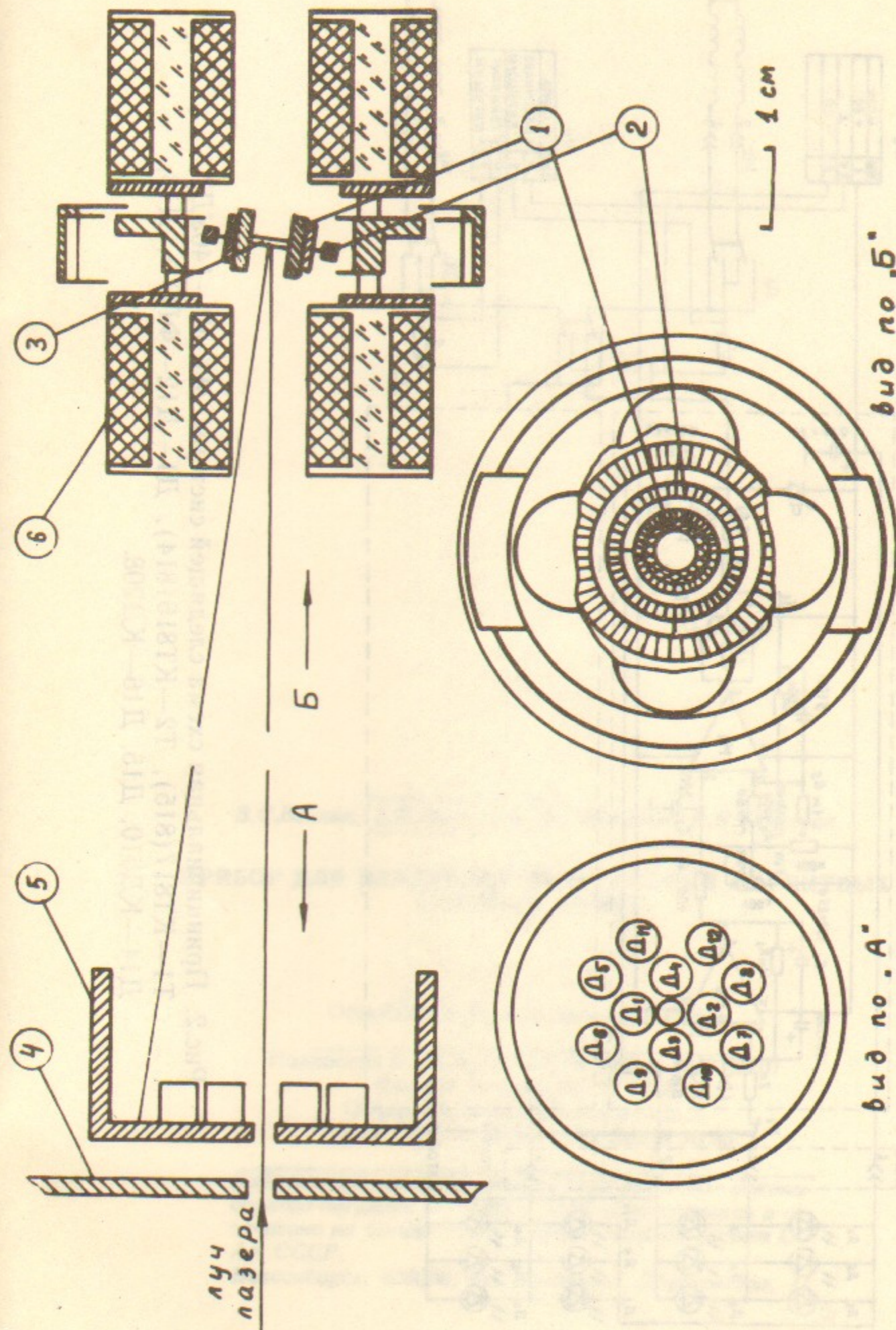


Рис.1. Схема прибора. 1—магнит, 2—карданный подвес, 3—зеркальце, 4—экран, 5—блок фотодиодов, 6—компенсирующая катушка. Расстояние от прибора до блока фотодиодов 2÷6 м.

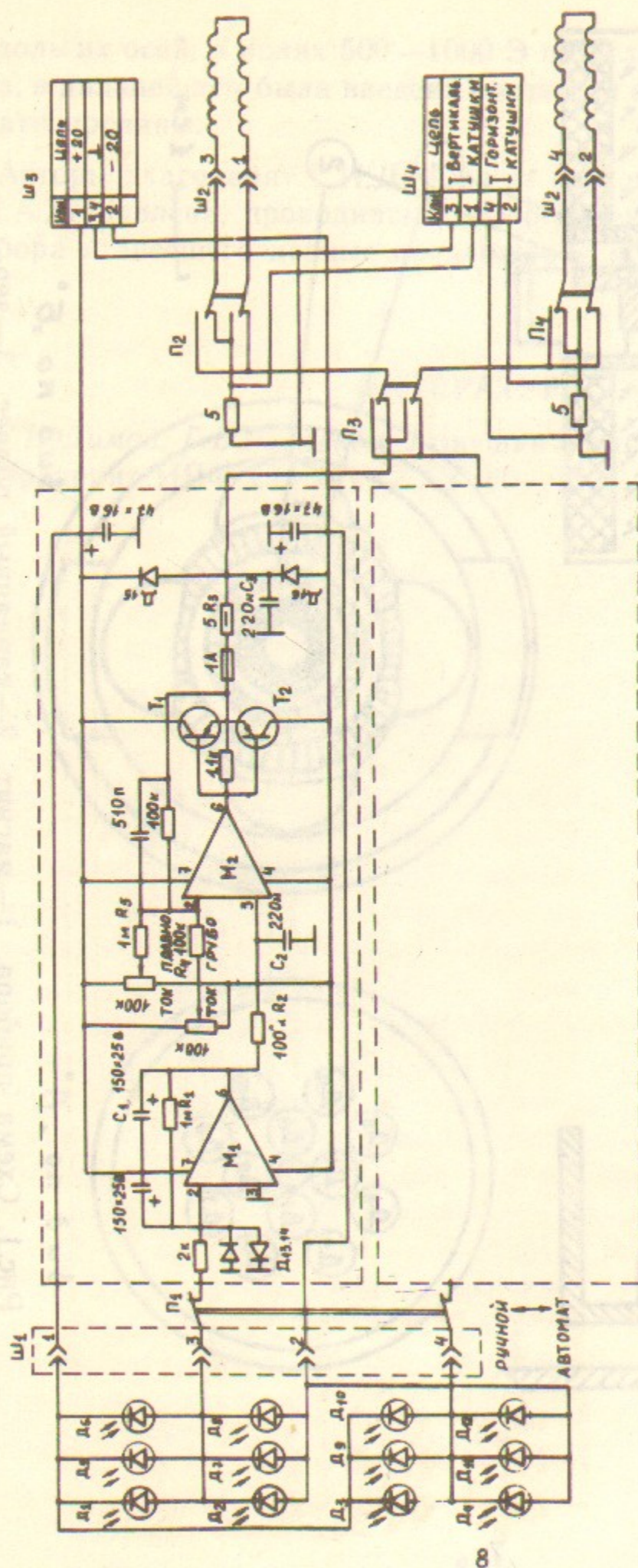


Рис.2. Принципиальная схема следящей системы. М1, М2—140УД7, Т1—КТ817(815), Т2—КТ816(814), Д1—Д12—ФП3-3, Д13, Д14—КД510, Д15, Д16—КД208.

В.С.Белкин, **Б.П.Санников**, В.Г.Соколов, И.Я.Тимошин

**ПРИБОР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ НАПРАВЛЕНИЙ МАГНИТНЫХ СИЛОВЫХ ЛИНИЙ.**

Ответственный за выпуск—С.Г.Попов

Подписано в печать 14 марта 1983 г. МН 03107

Формат бумаги 60×90 1/16.

Объем 0,5 печ.л., 0,4 учетно-изд.л.

Тираж 290 экз. Бесплатно. Заказ № 35

Набрано в автоматизированной системе на базе фотонаборного автомата ФА-1000 и ЭВМ «Электроника» и отпечатано на ротапринтере Института ядерной физики СО АН СССР, Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11