

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна



13 - 4143

Л.Б.Парфенов, Б.С.Неганов

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

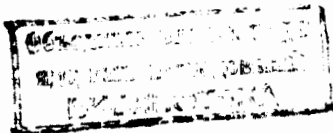
ПОЛЯРИЗОВАННАЯ ПРОТОННАЯ МИШЕНЬ

1968

13 - 4143

Л.Б.Парфенов, Б.С.Неганов

ПОЛЯРИЗОВАННАЯ ПРОТОННАЯ МИШЕНЬ



7585/2 up

## В в е д е н и е

Несколько лет назад был предложен и получил дальнейшее развитие весьма эффективный метод динамической поляризации протонов (д.п.п.) в некоторых гидратированных кристаллах, содержащих парамагнитные примеси.

Благодаря этому методу, ставшему известным в литературе под названием "солид-эффекта", были созданы высокополяризованные протонные мишени. Наилучшие результаты получены при использовании в качестве рабочего вещества мишени монокристаллов  $\text{La}_2\text{Mg}_3(\text{NO}_3)_{12} \cdot 24\text{H}_2\text{O}$  (LMN), в которых часть ионов La замещена парамагнитными ионами  $^{142}\text{Nd}$ . Сущность метода д.п.п. подробно изложена в работе /1/ и заключается в появлении значительной положительной или отрицательной поляризации протонов кристаллизационной воды при насыщении "запрещенных" переходов э.п.р. ионов  $^{142}\text{Nd}$ .

В описываемой мишени методом д.п.п. получена поляризация протонов ~70% в кристаллах LMN при напряженности магнитного поля  $H_0 \approx 20$  кэ и температуре  $T \approx 1^\circ\text{K}$ . Кристаллы выращены из раствора, в котором ~ 1% ионов был замещен ионами  $^{142}\text{Nd}$ . Мишень имеет размеры 20 x 20 x 30 мм и составлена из трех пластин прямоугольной формы, вырезанных из монокристаллов LMN и сложенных вместе своими естественными гранями. Суммарный вес - 26 г.

## 1. Блок-схема мишени

Блок-схема мишени показана на рис. 1. Кристаллы LMN помещены в микроволновой резонатор, который находится в горизонтальном отростке криостата, введенного в зазор электромагнита. Откачкой паров He в криостате поддерживается температура  $T = 1^{\circ}\text{K}$ . Насыщение "запрещенных" переходов э.п.р. осуществляется от с.в.ч. генератора, соединенного с резонатором волноводной линией передачи. Длина волны с.в.ч. генератора ( $\lambda = 4$  мм) стабилизирована схемой автоматической подстройки частоты (а.п.ч.) по внешнему опорному резонатору (волномеру). Магнитное поле стабилизировано с помощью ядерного магнитного резонанса (я.м.р.).

Измерение величины поляризации протонов производится по увеличению интенсивности сигналов я.м.р. с помощью Q - метра. Коаксиальный переключатель и генератор реверса предназначены для быстрого изменения направления поляризации.

## 2. Гелиевый криостат и резонатор

Конструкция криостата показана на рис. 2. К верхнему стальному фланцу 1 припаяна труба 2 из нержавеющей стали диаметром 70 мм с толщиной стенки 0,5 мм. В верхней части к ней припаян азотный бак 3, на котором имеется адсорбционный насос 4 из активированного угля. В нижней части трубы 2 укреплен радиатор 5, охлаждаемый парами откачиваемого гелия. К радиатору посредством трубки 6 из нержавеющей стали диаметром 34 мм и толщиной стенки 0,5 мм подвешен гелиевый бак 7 с отогнутым под углом  $90^{\circ}$  отроском 8, в котором расположен резонатор 9. Гелиевый и азотный баки имеют проволочные растяжки, обеспечивающие достаточную жесткость конструкции.

К азотному баку и радиатору припаяны тепловые экраны 10 и 11. Азотный экран 10 герметичен. Пространство внутри этого экрана заполняется теплообменным газом - гелием при давлении 0,1 мм рт.ст., что позволяет охлаждать весь криостат от комнатной до азотной температуры за 3 часа. Перед заливкой жидкого гелия обменный газ откачи-

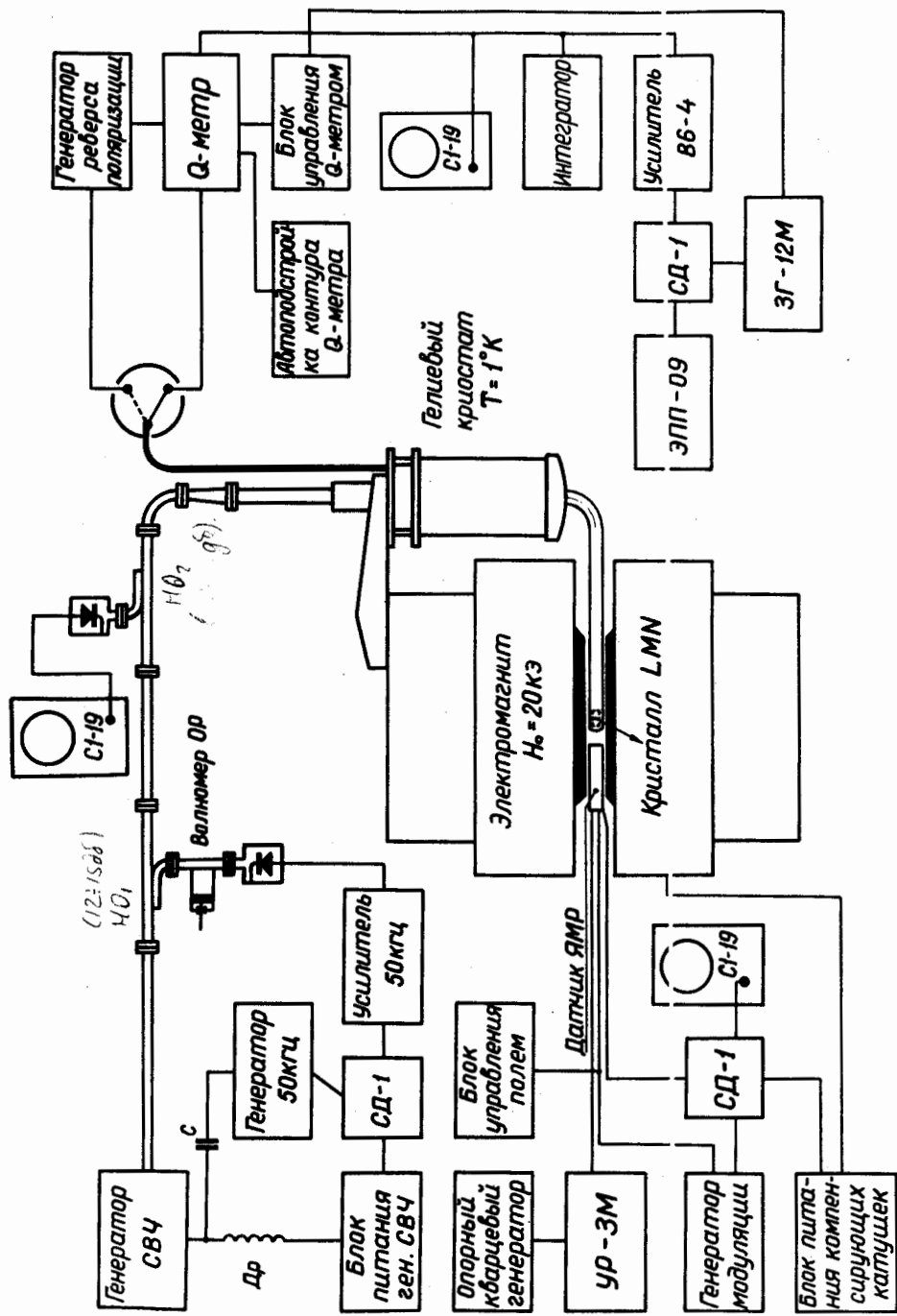
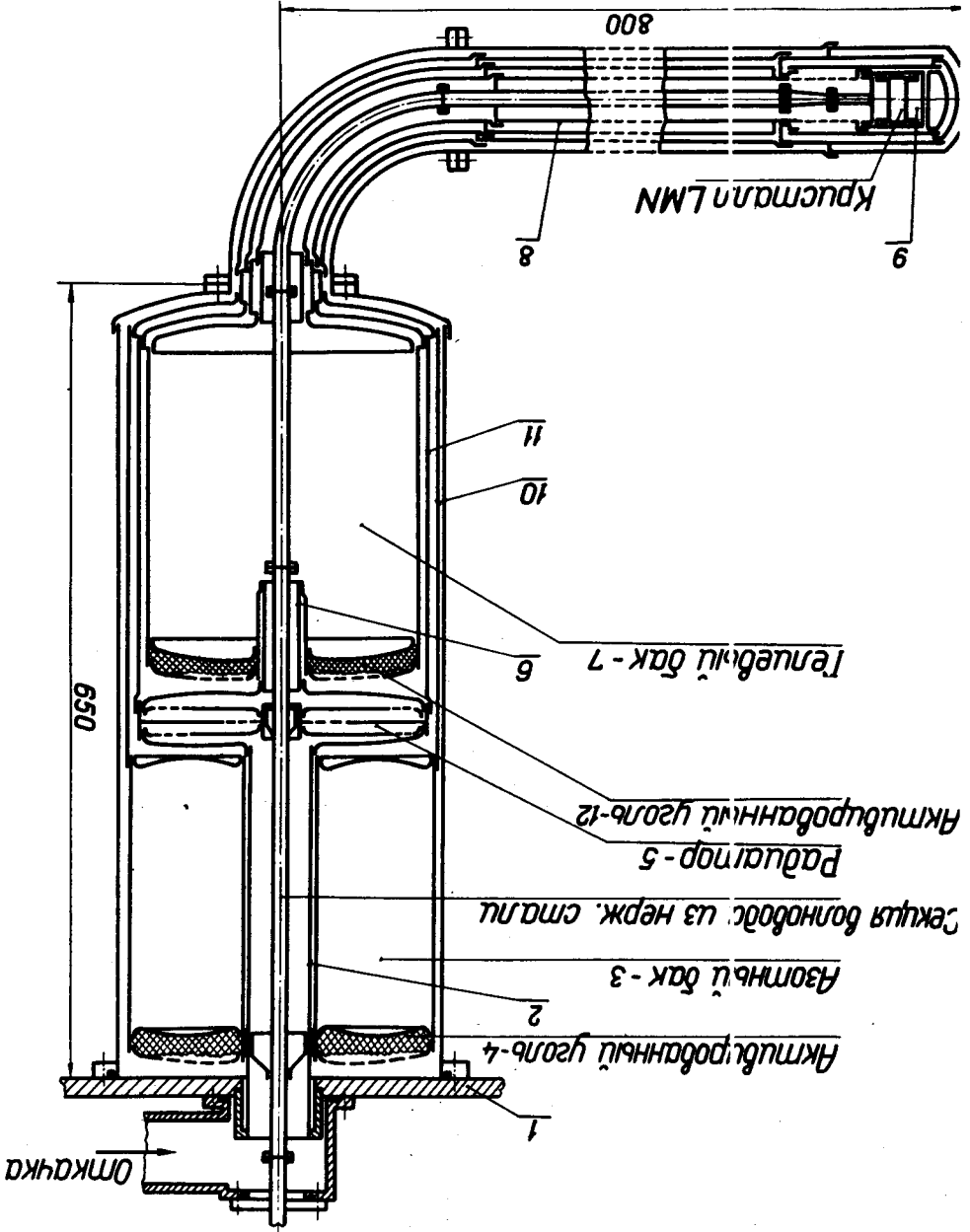


Рис.1. Блок-схема поляризованной мишени

Рис.2. Газовый криостат.



вается форвакуумным насосом, а его остатки поглощаются адсорбционным насосом 12, имеющимся на гелиевом баке.

Оба бака и тепловые экраны изготовлены из меди толщиной 1,0 мм. Отросток гелиевого бака сделан из трубы диаметром 34 мм из нержавеющей стали, на его конце укреплен резонатор (рис. 3), изготовленный из меди методом гальванопластики. Дно резонатора и боковые стенки (напротив кристаллов) имеют толщину 100 мк. Кристаллы  $LiNbO_3$ , ось  $z'$  которых направлена по оси отростка, закреплены в резонаторе с помощью тefлонового каркаса 13, который служит также каркасом радиокатушки 14, состоящей из двух пар витков, расположенных справа и слева от кристаллов. Начало катушки припаяно к резонатору, а конец выведен из кристата коаксиальным кабелем 15 с медной центральной жилой. Для уменьшения подвода тепла к гелиевому баку, оплетка кабеля имеет вставку из трубки длиной 500 мм из нержавеющей стали.

Поршень 16 резонатора жестко связан с волноводом 17 и может перемещаться вместе с ним при помощи гибкого вала 18. Отросток с резонатором закрыт тонкостенным стаканом 19 из нержавеющей стали, а азотный экран 10 - медным стаканом 20. Обе пайки 21 герметичны и выполнены сплавом Вуда для того, чтобы не перегревать кристаллы при сборке. Многократные вскрытия этого узла для смены кристаллов позволили нам убедиться в достаточной надежности при гелиевых температурах паек, выполненных сплавом Вуда. Между азотным экраном 10, экраном радиатора 11 и гелиевым отростком имеются стальные игольчатые распорки, обеспечивающие необходимую жесткость конструкции. Медный наружный кожух 22 оканчивается алюминиевым стаканом 23, приклеенным эпоксидной смолой. В области прохождения пучка частиц стаканы 20 и 23 имеют тонкостенные окна из медной и алюминиевой фольги толщиной 0,15 и 0,25 мм соответственно, а стакан 19 имеет кольцевую проточку.

Для охлаждения гелиевого бака с отростком от азотной до гелиевой температуры расходуется около 6 л жидкого гелия. Затем в гелиевый бак заливается 9 литров гелия, из которых около 3 литров испаряются при охлаждении до температуры  $1^{\circ}K$ . Оставшегося гелия хватает на 8-10 часов работы при непрерывно включенном с.в.ч. генераторе.

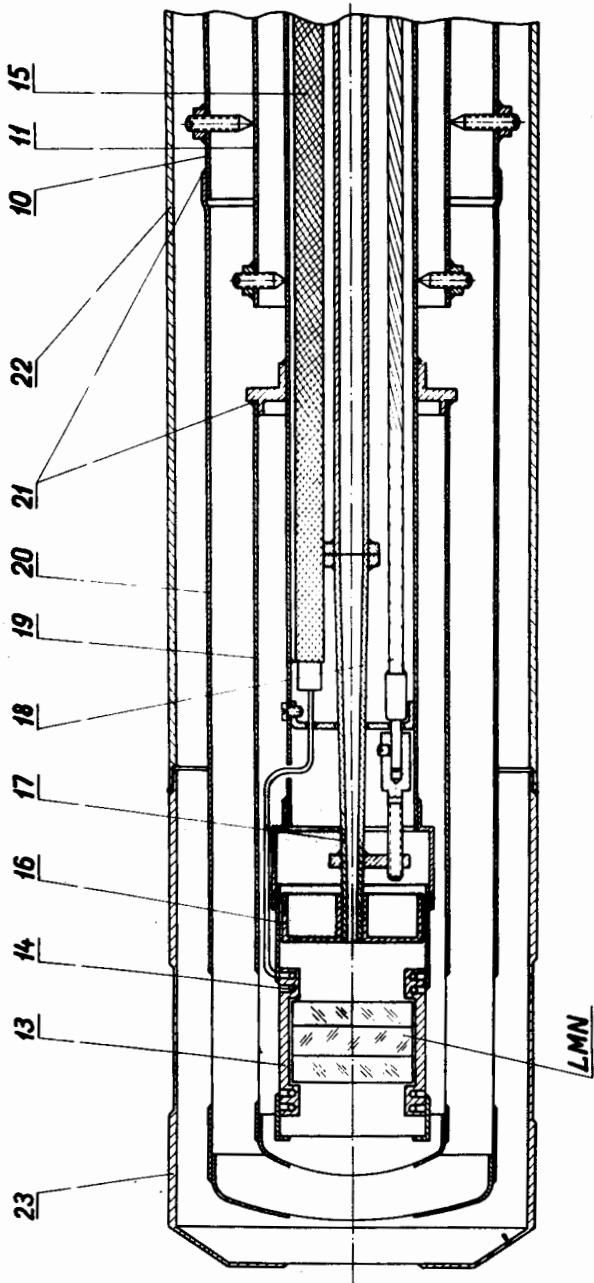


Рис.3. Резонатор.



Испарение гелия за счет паразитного подвода тепла (без включения с.в.ч. генератора) составляет приблизительно 50-60 литров газообразного гелия в час.

### 3. Гелиевые коммуникации

Схема гелиевых коммуникаций показана на рис. 4. Форвакуумный насос 1 (типа ВН-461) служит для начальной откачки обоих вакуумных объемов криостата. Переливание жидкого гелия из стандартного сосуда Дюара 3 (типа СД-1) осуществляется с помощью сифона 2 под давлением газообразного гелия, поступающего в сосуд Дюара через редуктор 4 и азотную ловушку 5. Давление газа контролируется мановакуумметром 6 и составляет величину 0,05 - 0,15 атм на различных станциях заливки.

Испаряющийся из криостата гелий поступает через U-образный масляный расходомер 7 в газгольдер 8.

Откачка паров гелия производится по трубе 10 диаметром 350 мм, длиной около 20 метров, со скоростью 1500 литров/сек при давлении 0,1 мм рт.ст. двумя насосами 11 и 12 (типа ДВН-1500 и ВН-4).

Газообразный гелий, собранный в газгольдер, перекачивается мембранным компрессором 13 (типа МК 2,5/200) в стандартные 40-литровые баллоны и отправляется на ожигательную станцию.

### 4. Электромагнит

Стандартный электромагнит типа СП-56 был переделан в С-образный. Его катушки сближены до расстояния между ними 120 мм и установлены конические полюсные наконечники из мягкой стали. Наименьший диаметр наконечников - 470 мм, зазор между полюсами - 80 мм. Такая переделка электромагнита СП-56 позволила получить в центре зазора поле 20 кэ при токе в катушках 320 ампер.

При включении электромагнита между полюсами возникает значительная стягивающая сила, деформирующая зазор. Поэтому для сохранения зазора и параллельности полюсов в зазор были вставлены две цилинд-

рические распорки из дюралюминия диаметром 100 мм. Эта мера позволила получить в месте расположения мишени область магнитного поля с устойчивой неоднородностью не хуже  $10^{-4}$  (рис. 5).

Помимо обычной электронной стабилизации тока мотор-генератора, питающего электромагнит, применялась стабилизация магнитного поля с помощью я.м.р. В качестве датчика сигналов я.м.р. использовался недозабужденный автодин, подобный описанному в работе /2/, с лампой, расположенной непосредственно в зазоре электромагнита. Датчик возбуждается высокочастотным опорным напряжением одной из гармоник кварцевого генератора КГВ через широкополосный усилитель УР-3М, (см. рис. 1). Настройка контура датчика на нужную гармонику осуществляется с помощью варикапа Б7-Б, что позволяет управлять датчиком дистанционно.

Поскольку гармоники от генератора КГВ идут через 1 Мгц, а в ампулу датчика налита обычная вода, расстояние между соседними стабилизируемыми значениями магнитного поля составляет 235 эрстед. Для того чтобы сделать стабилизируемую величину поля непрерывной, через модуляционные катушки датчика вместе с синусоидальным током (50 гц) пропускается небольшой постоянный ток /3/, который создает в месте расположения катушки датчика с образцом небольшое магнитное поле  $\Delta H$ , направленное по или против основного поля.

Легко видеть, что система стабилизации будет поддерживать неизменной сумму или разность  $H_0$  и  $\Delta H$ , удовлетворяя условию

$$\gamma(H_0 \pm \Delta H) = \omega_n,$$

где  $\gamma$  - гиромангнитное отношение протонов,  $\omega_n = 2\pi f_n$  - частота  $n$ -гармоники генератора КГВ.

Точность стабилизации, присущая методу стабилизации по я.м.р., при этом практически не нарушается, так как даже для создания максимального вспомогательного поля  $\Delta H_{\text{макс.}} = \pm \frac{1}{2} \cdot 235$  э требуется ток порядка 100 ма, который достаточно поддерживать с точностью 1%, что может быть легко осуществлено с помощью обычного выпрямителя, стабилизированного то напряжению.

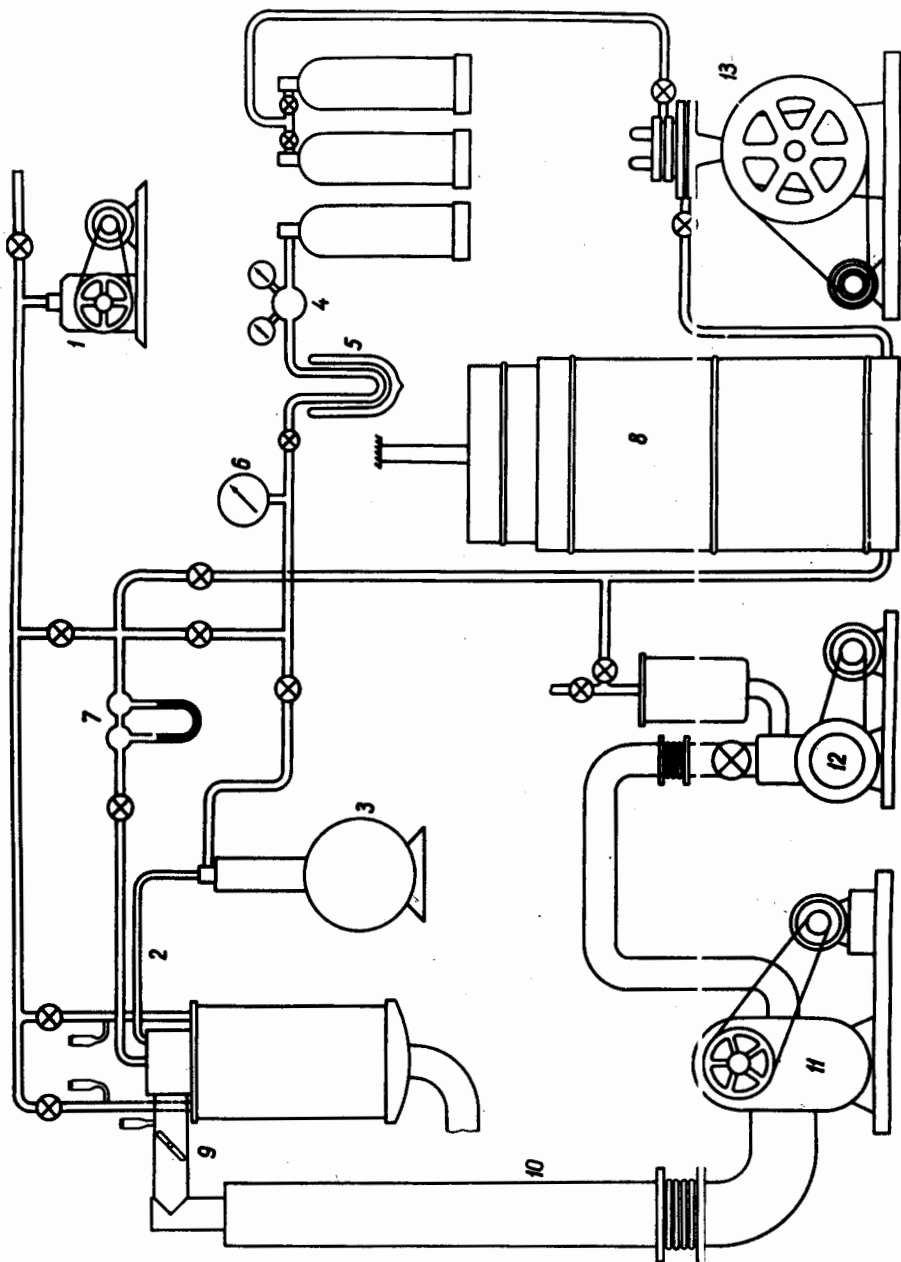


Рис.4. Схема гелиевых коммуникаций поляризованной машины.

1 2 3 4 5 см.

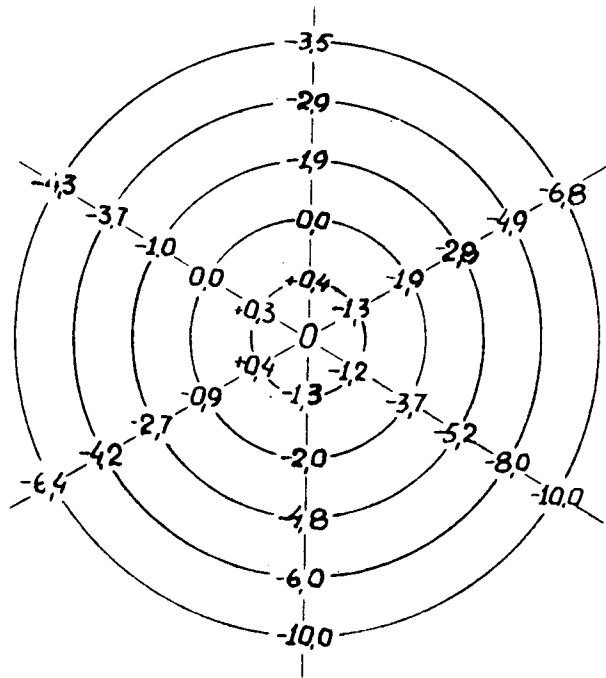


Рис.5. Распределение магнитного поля в средней плоскости зазора переделанного электромагнита СП-56. Поле в центре - 20000 эрстед. Цифры - отклонение от поля в центре (в эрстедах).

Так как центральная зона зазора электромагнита занята самой мишенью, то датчик я.м.р. расположен сбоку в спадающем поле. Поэтому он снабжен катушками для компенсации градиента магнитного поля, подобными описанным в /2/.

Длительная стабильность поля, полученная с помощью описанной системы, составляла  $\approx 5 \cdot 10^{-5}$  при  $H_0 = 20$  кэ.

На рис. 6 приведена принципиальная схема датчика я.м.р., а на рис.7 принципиальная схема блока регулирования тока в компенсирующих катушках (б.р.т.), который состоит из фазовращателя (транзисторы  $T_1 - T_3$ ), синхронного детектора - ( $T_4 + T_9$ , диоды  $D_1, D_2$ ) и непосредственно схемы регулирования тока в компенсирующих катушках ( $T_{11} - T_{16}$ ). Реле тока  $P_1$  служит для предохранения от выхода из строя транзисторов  $T_{11} - T_{14}$ , когда в компенсирующих катушках появляется значительная э.д.с. (при резких колебаниях поля или аварийном отключении электромагнита).

Как правило, применялась частота модуляции 50 герц. Глубина модуляции поля составляла 2-3 ширины линии я.м.р.

### 5. С.в.ч. система

В качестве с.в.ч. генератора использовалась лампа обратной волны (л.о.в.) мощностью около 1 вт и с  $\lambda = 4$  мм. Связь с резонатором осуществляется волноводной линией передачи.

В связи с тем, что потери с.в.ч. энергии в волноводе основного сечения (1,8 x 3,6 мм) недопустимо велики, в описываемой конструкции применен волновод большего сечения 4,3 x 10,7 мм. Передача энергии по такому волноводу осуществляется волной типа  $H_{01}$  (вектором  $\vec{E}$ , параллельным широкой стенке). (При передаче энергии по волноводу основного сечения волной основного типа  $H_{10}$ , вектор  $\vec{E}$  параллелен узкой стенке).

Как показано в работе /4/, теоретические потери в такой линии передачи на частотах  $\approx 70$  Гц пренебрежимо малы по сравнению с потерями в волноводе основного сечения.

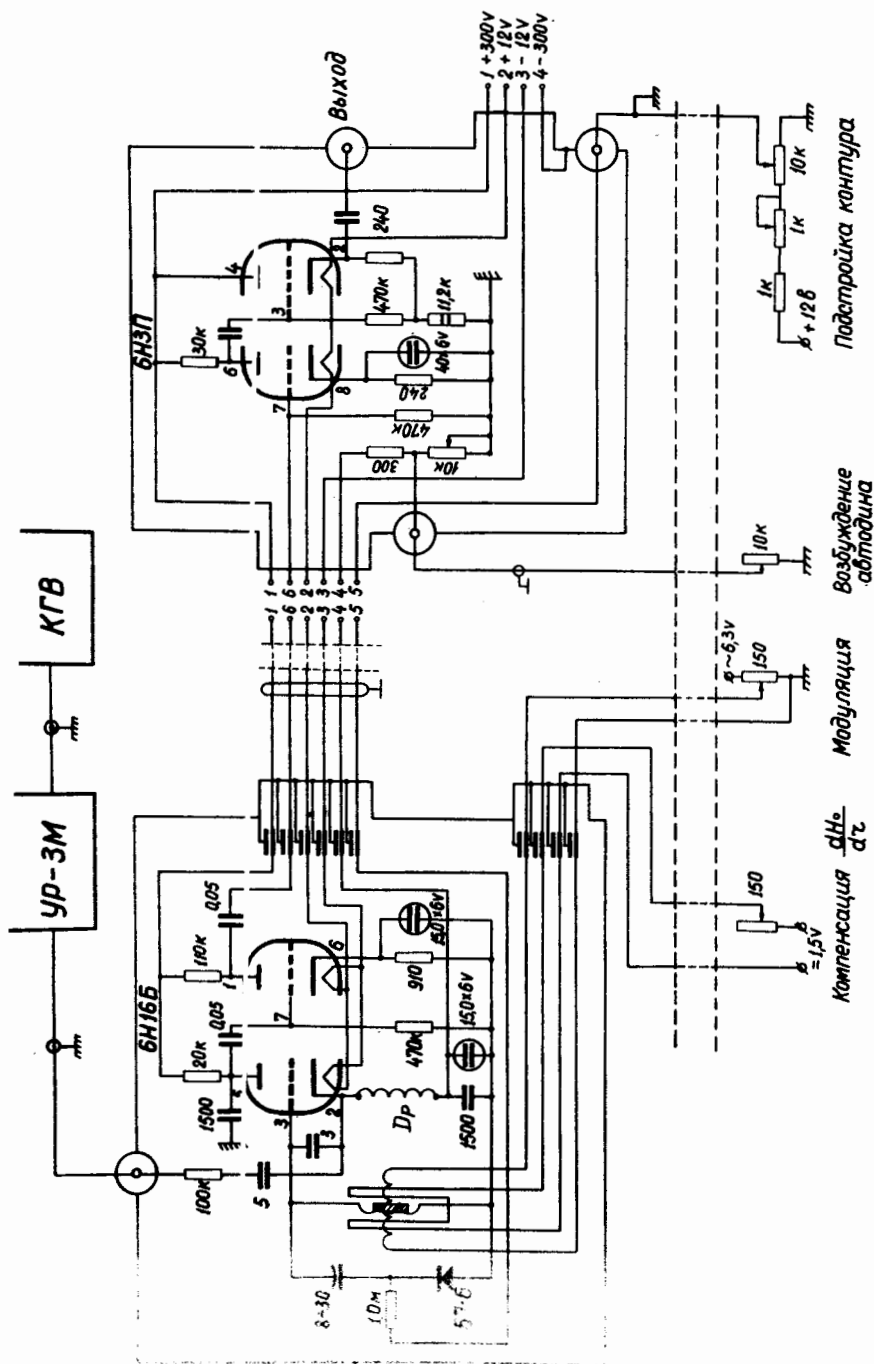


Рис.6. Схема датчика я.м.р.

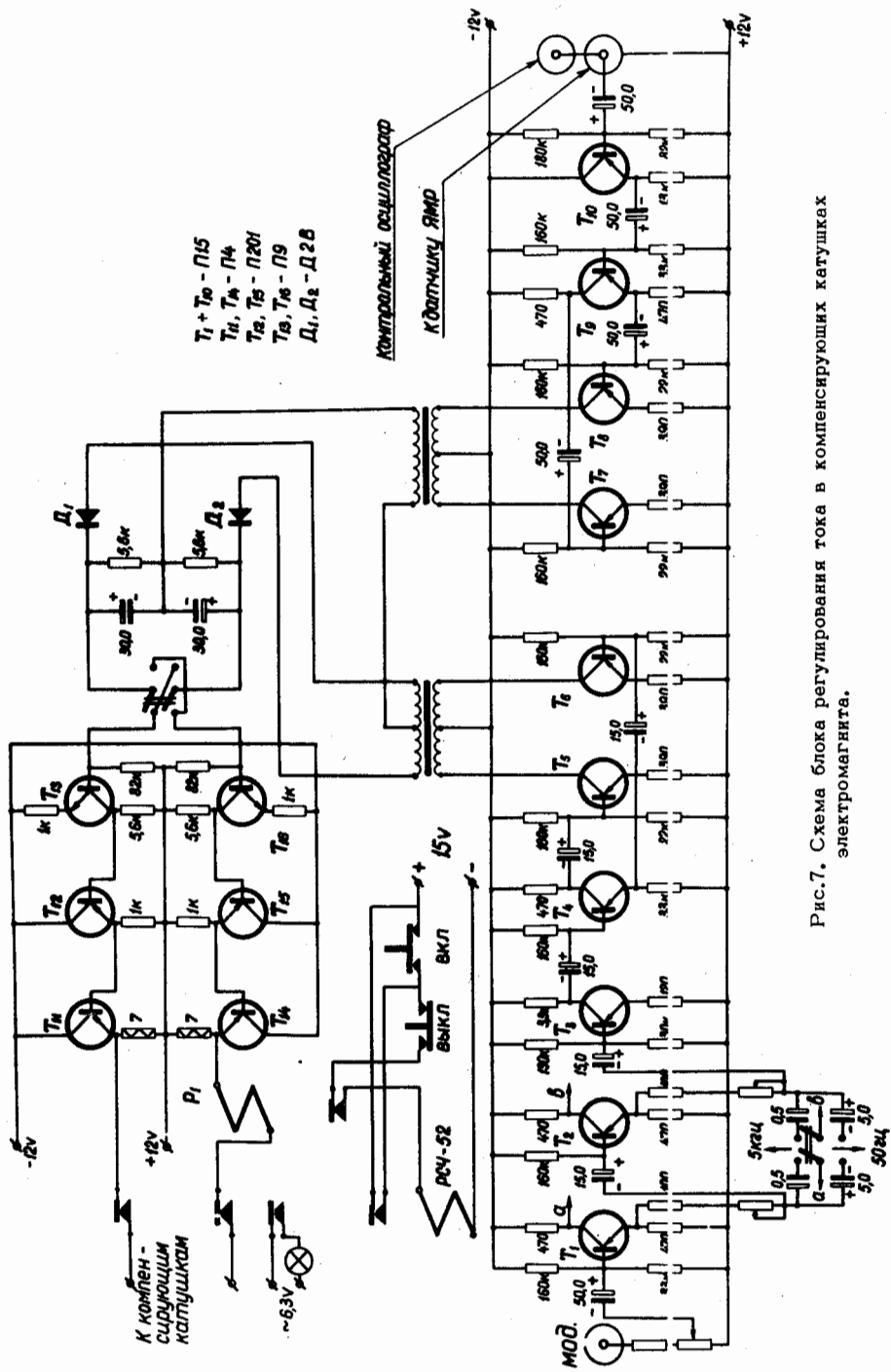


Рис.7. Схема блока регулирования тока в компенсирующих катушках электромагнита.

Преобразование волны  $H_{10}$  в волну  $H_{01}$  осуществляется с помощью плавного перехода от волновода с сечением  $1,8 \times 3,6$  мм к волноводу с сечением  $4,5 \times 10,7$  мм. При этом узкая стенка малого волновода переходит в широкую стенку большого волновода. Длина перехода 75 мм, изготовлен он из меди методом гальванопластики.

С целью уменьшения подвода тепла к гелиевому баку средняя часть волновода выполнена из нержавеющей стали (см. рис. 2). Толщина стенки - 0,25 мм, внутренняя поверхность обмеднена. Потери в нашей линии передачи - не более 3 дБ.

Связь резонатора с волноводом осуществляется таким же волноводным переходом. Контроль настройки осуществляется по величине отраженной мощности. Для этой цели используется направленный ответвитель  $HO_2$ , детекторная головка  $D_2$  и милливольтметр или осциллограф постоянного напряжения.

Однако опыт показал, что тщательной настройки резонатора не требуется, т.к. при указанных размерах почти полностью заполненный кристаллом резонатор является многомодовым, и в нем всегда существуют один или несколько типов колебаний при любом положении поршня. Кроме того, вблизи э.п.р. магнитные свойства кристалла сильно изменяются, вызывая дополнительную перестройку резонатора. Частотная модуляция с.в.ч. генератора, необходимая для работы автоматической подстройки его частоты, оказывается весьма полезной, при "качании" частоты возбуждаются смежные типы колебаний, равномерно облучая микроволновым полем весь объем кристалла. Это приводит к некоторому увеличению максимальной величины поляризации и увеличению скорости ее накачки.

Автоматическая подстройка частоты (а.п.ч.) работает по методу частотной модуляции стабилизируемого генератора /5/.

Напряжение питания к л.о.в. подведено через дроссель  $D_p$  (см.рис.1). Одновременно к л.о.в. через конденсатор  $C$  подведено небольшое переменное напряжение с частотой 50 кгц, которое вызывает частотную модуляцию л.о.в. с малой девиацией частоты. Часть с.в.ч. мощности при помощи направленного ответвителя  $HO_1$  подводится к опорному резонатору  $OP$  и детектору  $D_1$ . При отклонении средней частоты л.о.в. от



собственной частоты ОР, в нагрузке  $D_1$  появляется переменное напряжение с частотой 50 кГц.

Это напряжение, амплитуда и фаза которого зависят от величины и направления ухода частоты л.о.в., усиленное резонансным услителем, подается в синхронный детектор (с.д.), где вырабатывается сигнал ошибки. Последний вводится в стабилизатор напряжения питания л.о.в., возвращая ее среднюю частоту к собственной частоте ОР.

Генератор 50 кГц, резонансный усилитель и синхронный детектор конструктивно выполнены в виде одного блока, принципиальная схема которого приведена на рис. 8.

Направленные ответвители  $\Pi O_1$  и  $\Pi O_2$  с коэффициентом ослабления 12-15 дБ взяты из комплекта волноводных устройств ЭО-3. Опорный резонатор ОР имеет добротность  $Q \approx 10^3$ . Детекторы  $D_1$  и  $D_2$  - типа Д-407.

## 6. Измерение поляризации

Измерение поляризации производится по увеличению интенсивности сигнала ЯМР. Поляризация протонов Р, по определению равная

$$P = \frac{N_+ - N_-}{N_+ + N_-},$$

где  $N_+$  и  $N_-$  - число протонов в состоянии с проекцией спина по и против поля, с другой стороны, равна

$$P = \text{const} \int_{-\infty}^{\infty} \chi'' d\omega \dots, \quad (1)$$

где  $\chi''$  - мнимая часть радиочастотной восприимчивости протонов в ЛМН

$$\chi = \chi' - i\chi''.$$

$\chi''$  - описывает поглощение (или испускание - в случае отрицательной поляризации) энергии, которое может быть обнаружено методами я.м.р.

В нашем случае наблюдение сигналов я.м.р. производилось на частоте 85 МГц методом  $Q$  - метра <sup>16/</sup>. Для этого в резонаторе имеется описанная выше радиокатушка (см. рис. 3), которая присоединяется коак-



сиальным кабелем длиной, кратной  $\frac{1}{\sqrt{\epsilon}} \cdot \frac{\lambda}{2}$ , к конденсатору С на входе Q - метра, образуя контур я.м.р.  $\frac{1}{\sqrt{\epsilon}}$  - коэффициент укорочения волны в данном кабеле, определяемый экспериментально.

Хорошо известно, что импеданс Z параллельного контура LC с парамагнитным веществом в поле катушки может быть представлен выражением:

$$\frac{1}{Z} = \frac{1}{r + i\omega L(1 + 4\pi\eta\chi)} + i\omega C,$$

где  $\chi = \chi' - i\chi''$ , а r и  $\eta$  - сопротивление катушки и коэффициент заполнения.

В методе Q - метра контур слабо связан с высокочастотным генератором, и последний является как бы генератором тока. При этом высокочастотное напряжение на контуре равно

$$V = JZ.$$

Когда наступают условия я.м.р., то относительное изменение Z контура и, следовательно, относительное изменение напряжения на нем может быть представлено в виде

$$\frac{Z_0 - Z(\omega)}{Z_0} = \frac{V_0 - V(\omega)}{V_0} = \frac{X''(\omega)}{1 + X''(\omega)} + \frac{1}{2} \frac{X'^2(\omega)}{(1 + X''(\omega))^2} + \dots = \frac{v(\omega)}{V_0},$$

где  $Z_0$  и  $V_0$  - импеданс и напряжение на контуре в отсутствие я.м.р.

$$X'(\omega) = 4\pi\eta Q \chi'(\omega),$$

$$X''(\omega) = 4\pi\eta Q \chi''(\omega), \quad Q - \text{добротность контура.}$$

Член  $\frac{X''(\omega)}{1 + X''(\omega)}$  является главной частью этого выражения. Произведение  $\eta Q$  можно выбрать таким, что при максимальной поляризации величина  $X''(\omega) = 4\pi\eta Q \chi''(\omega)$  будет  $\approx 0,1 + 0,2$ , при этом вклад в измеряемую величину  $\frac{v(\omega)}{V_0}$  от остальных членов будет  $\approx 1,5 + 3\%$ , и ими можно пренебречь.

Здесь уместно отметить, что стремиться к получению добротности контура выше 50 не следует, так как при этом затрудняется измерение высокой отрицательной поляризации протонов из-за мазерного эффекта.

Таким образом, мы полагаем:

$$\frac{v(\omega)}{V_0} = \frac{X''(\omega)}{1 + X''(\omega)} \dots \quad (2)$$

Здесь  $\frac{v(\omega)}{V_0}$  — измеряемая величина, причем  $v(\omega)$  описывает форму наблюдаемого сигнала я.м.р. (поглощения или испускания).

Интегрирование выражения (2) дает нам некоторую величину  $P'$ , которая может служить мерой поляризации

$$P' = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{v(\omega)}{V_0} d\omega = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{4\pi\eta Q X''(\omega)}{1 + 4\pi\eta Q X''(\omega)} d\omega \dots \quad (3)$$

Введем измеренный коэффициент увеличения поляризации

$$E_{\text{изм.}} = \frac{P'}{P'_0} \dots \quad (4)$$

где  $P'_0$  — величина, полученная при интегрировании сигнала я.м.р. в тепловом равновесии, когда поляризация известна и равна:

$$P'_0 = \text{th} \frac{\mu H_0}{kT} \approx 10^{-7} \frac{H_0}{T^{\circ}\text{K}}$$

Сравнивая выражения (1) и (3), легко видеть, что при высокой поляризации, вследствие нелинейной связи  $v(\omega)$  и  $X''(\omega)$ , величина  $E_{\text{изм.}}$  получается несколько заниженной для положительной поляризации и несколько завышенной для отрицательной. Истинный коэффициент увеличения поляризации может быть получен введением поправки вида:

$$E_{\text{изм.}} = E_{\text{изм.}} (1 + \delta) \dots \quad (5)$$

В работе /7/ сделан теоретический анализ работы Q-метра и рассчитаны поправки  $\delta$  с учетом параметров коаксиального кабеля и влияния

дисперсии  $\chi'(\omega)$ . Форма линии я.м.р. от поляризованных протонов в LMN была имитирована суммой трех гауссовских линий.

Величину  $\delta$  можно получить приближенно, проведя упрощенный анализ работы Q-метра без учета влияния дисперсии и параметров кабеля, заменив реальную форму линии я.м.р. одиночной лоренцевской линией (блоховская восприимчивость):

$$\chi''(\omega) = \frac{1}{2} \chi_0 \omega_0 \pi \frac{T_2}{\pi} \frac{1}{1 + (\omega - \omega_0)^2 T_2^2} = \frac{1}{2} \chi_0 \omega_0 \pi f(\omega).$$

Следуя такому упрощенному анализу, можно получить выражение для E в виде

$$E = E_{\text{изм.}} \cdot \left( 1 \pm \frac{1}{2} \frac{v(\omega^*)}{V_0} \right), \quad (6)$$

следовательно, поляризация будет равна

$$P = E_{\text{изм.}} \cdot \left( 1 \pm \frac{1}{2} \frac{v(\omega^*)}{V_0} \right) P_0, \quad (7)$$

где знаки + и - относятся соответственно к положительной и отрицательной поляризации,  $P_0$  - известная поляризация в тепловом равновесии, а  $v(\omega^*)$  берется равной амплитуде наибольшего из пиков реально наблюдаемой (на экране осциллографа, см. рис. 9) формы сигнала я.м.р.

На рис. 10 и 11 представлены значения положительной и отрицательной поляризации, поддерживаемой в течение нескольких часов в мишени. Гистограмма - поляризация, вычисленная из измерения асимметрии в упругом p-p рассеянии на угол  $130^\circ$  (с.д.и.) при энергии налетающих протонов 680 Мэв.

Как видно, совпадение вполне удовлетворительно.

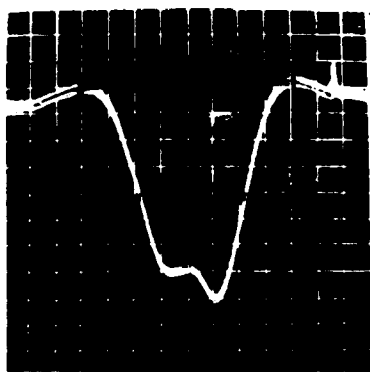


Рис.9. Сигнал я.м.р., соответствующий положительной поляризации протонов в кристалле LMN.

#### 7. Описание Q - метра и вспомогательных устройств

Принципиальная схема Q - метра, выполненного в виде отдельного блока, приведена на рис. 12. Высокочастотное напряжение от в.ч. генератора ( $L_{1a}$ ) через очень маленький ( $< 1\text{пф}$ ) конденсатор подается на контур я.м.р. В.ч. генератор снабжен стабилизатором амплитуды в.ч. напряжения ( $L_2, L_{3a}, L_{3б}$ ). В его контур  $L_1 C_1$  включен варикап Б7-Б, который служит для дистанционного управления частотой в зависимости от режима работы.

Напряжение на контуре я.м.р. усиливается полосовым усилителем ( $L_5 - L_{10}$ ), состоящим из трех расстроенных "двоек" и имеющим плоскую вершину (от 83 до 87 мгц) частотной характеристики /8,9/. Катодный повторитель ( $L_4$ ) служит для согласования входного сопротивления усилителя с контуром я.м.р.

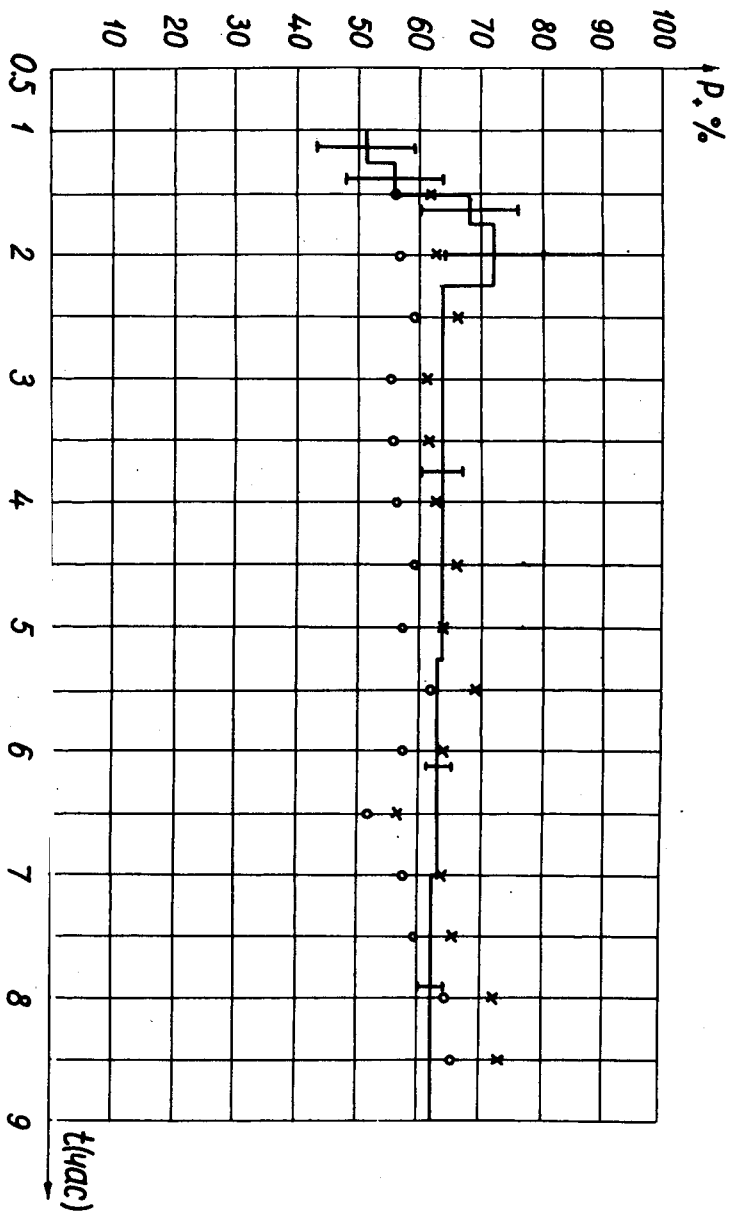


Рис.10. Положительная поляризация. o - измеренные значения поляризации; x - значения поляризации с поправкой  $(1 + \frac{1}{\gamma} \frac{v(\omega^*)}{v_0})$ , гистограмма-поляризация, полученная из P-r рассеяния на угол 130° (с.л.м.) при энергии протонов 680 Мэв.

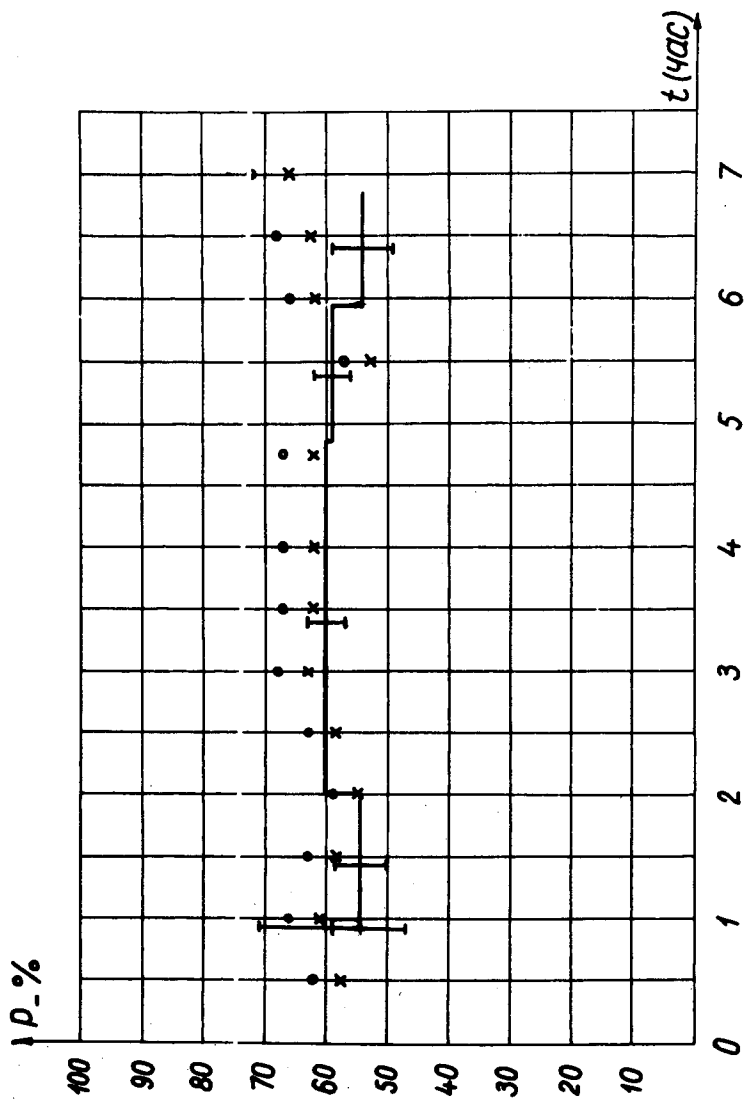


Рис.11. Отрицательная поляризация. O - измеренное значение поляризации; X - значение поляризации с поправкой  $(1 - \frac{1}{2} \frac{v(\omega^*)}{V_0})$ , гистограмма-поляризация, полученная из р-р рассеяния на угол 130° (с.д.м.) при энергии протонов 680 Мэв.



Коэффициент усиления полосового усилителя вместе с катодным повторителем составляет примерно 200-250. Такое усиление выбрано по следующим соображениям: в.ч. напряжение на контуре я.м.р. обычно составляет величину порядка 5 мв (при напряжении >10 мв происходит насыщение сигнала я.м.р.), а для того, чтобы диодный детектор Д на выходе усилителя работал на линейном участке своей характеристики, необходимо, чтобы последний развивал напряжение не менее 1 вольт. Этим и определяется указанная величина коэффициента усиления.

Продетектированный сигнал усиливается усилителем низкой частоты ( $L_{11a}$ ) и через катодный повторитель ( $L_{11b}$ ) подается по кабелю на пульт управления мишенью, который находится на расстоянии около 70 метров от последней.

В контур я.м.р. также включен варикап Б7-Б, который служит для дистанционной подстройки.

Назначение лампы  $L_{12}$  будет пояснено ниже. Для обеспечения много-часовой стабильной работы Q-метра его питание, включая накал ламп, осуществляется от стабилизированных источников.

На рис. 13 приведена принципиальная схема блока управления (б.у.) режимом работы Q-метра.

В б.у. вырабатывается периодическое пилообразное напряжение, которое подается на варикап в контуре в.ч. генератора, периодически изменяя его частоту. В зависимости от характера периодичности возможны следующие режимы работы Q-метра:

1. Запись производной сигнала я.м.р. от протонов в LMN на ленте самописца ЭПП-09.

2. Наблюдение сигнала я.м.р. -  $v(\omega)$  на экране осциллографа и одновременная запись на ЭПП-09 коэффициента Фурье  $a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T v(t') dt'$  при периодической развертке частоты  $50 \frac{\text{раз}}{\text{сек}}$ .

3. Аналоговое интегрирование сигнала я.м.р. при редкой развертке частоты ( $\approx 1 \frac{\text{раз}}{\text{сек}}$ ).

4. Однократная развертка частоты, используемая при адиабатическом прохождении линии я.м.р. для быстрого реверсирования направления поляризации.



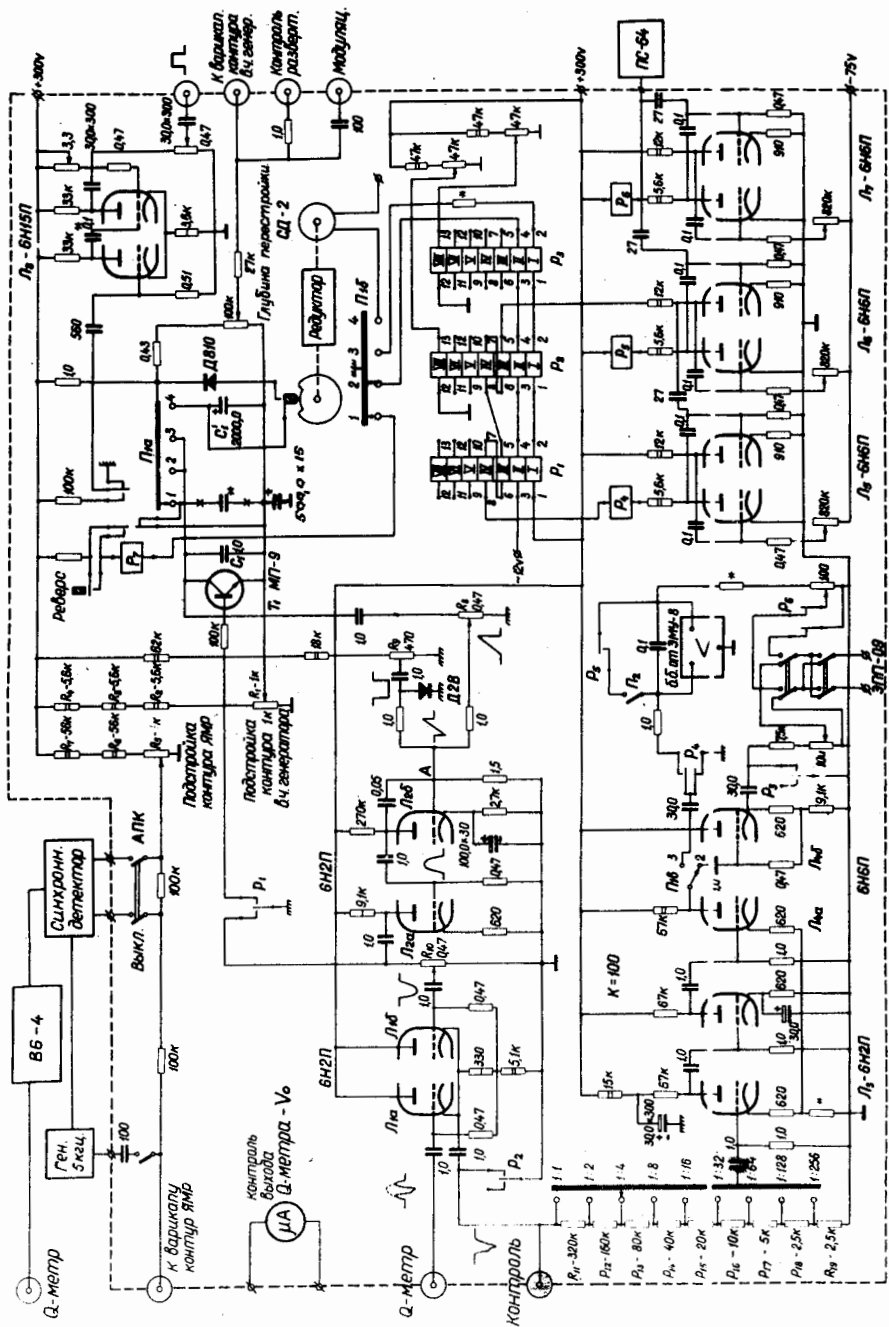


Рис.13. Схема блока управления Q - метром.

Двухлетний опыт эксплуатации мишени при проведении физического эксперимента показал, что самым удобным и эффективным оказался режим 2. Для этого переключатель  $\Pi_1$  ставится в положение 2, при этом на одну из обмоток поляризованных реле  $P_1$ ,  $P_2$ , и  $P_3$  (типа РП-5, семиобмоточные) подается переменное напряжение 12 вольт с частотой 50 герц. Контакты реле  $P_1$  периодически открывают и закрывают транзистор  $T_1$  типа МП-9, параллельно которому подключен конденсатор  $C_1 = 1$  мкф. пилообразное напряжение, получающееся при заряде этого конденсатора через сопротивление  $R = 1,0$  мом и разряде через открытый транзистор, складывается с постоянным напряжением, снимаемым с делителя  $R_1 - R_4$ , и подается на варикап в контуре в.ч. генератора.

Величина постоянного напряжения обуславливает начальную емкость варикапа и, следовательно, начальную частоту в.ч. генератора. Контур я.м.р. настраивается на среднюю частоту в.ч. генератора с помощью потенциометра в делителе  $R_5 - R_7$ , при этом на экране осциллографа, подключенного к выходу  $Q$ -метра, наблюдается характерная дуга параболической формы (впредь будем называть ее просто дугой), представляющая собой вершину резонансной кривой контура я.м.р.

На рис. 9 показан сигнал я.м.р., соответствующий положительной поляризации  $\approx 30\%$  ( $E_{\text{изм}} = 150$ ), наблюдаемый на фоне дуги. Сигнал я.м.р. при тепловом равновесии при этом почти не виден.

Дуга может быть скомпенсирована сравнительно простым способом. Часть пилообразного напряжения развертки, снимаемого с потенциометра  $R_8$ , суммируется в точке А интегрирующего каскада  $L_{2б}$  с прямоугольным отрицательным импульсом такой же длительности. Полученная после интегрирования искусственная дуга усиливается лампой  $L_{2а}$  и подается на правый вход дифференциального катодного повторителя ( $L_{1а}$ ,  $L_{1б}$ ). На принципиальной схеме б.у. (см. рис. 13) показаны формы напряжений в различных точках схемы компенсации дуги.

На левый вход дифференциального катодного повторителя поступает с выхода  $Q$ -метра сигнал я.м.р. с дугой. Подбирая амплитуду и форму компенсирующей дуги потенциометрами  $R_8$ ,  $R_9$  и  $R_{10}$ , можно получить достаточно полную компенсацию и хорошо выделить даже неусиленный сигнал я.м.р.

На рис. 14 показан выделенный таким образом неуслышимый сигнал я.м.р. при тепловом равновесии. На рис. 15(а) показан сигнал я.м.р., усиленный примерно в 30 раз, а для сравнения на рис. 15(б) – тот же сигнал на фоне дуги.

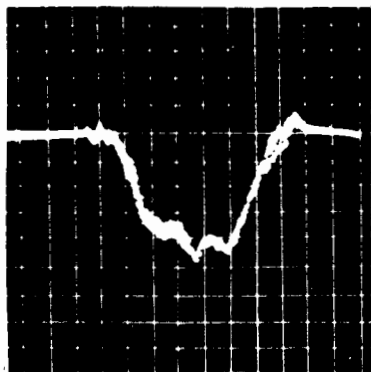
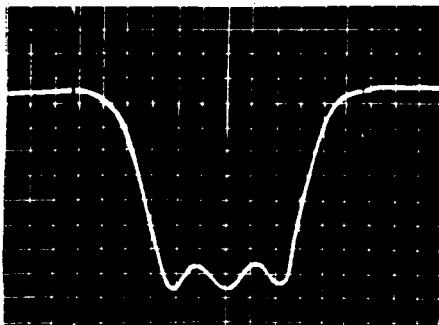


Рис.14. Сигнал я.м.р., соответствующий поляризации протонов в тепловом равновесии.

Для обеспечения более надежной работы схемы выход дифференциального катодного повторителя в промежутках между сигналами я.м.р. закорачивается на землю с помощью поляризованного реле  $F_2$ . Пропуская постоянный ток через одну из обмоток этого реле, можно сделать его работу асимметричной, открывая выход катодного повторителя только на время прохождения сигнала.

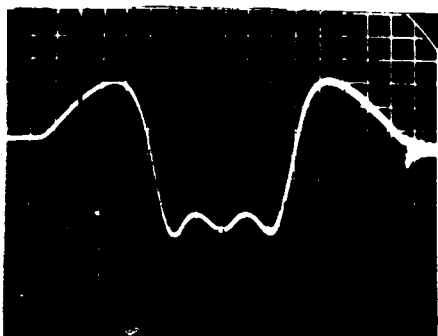
Далее сигнал я.м.р. через калиброванный аттенюатор  $R_{11} - R_{19}$  и усилитель ( $L_3 - L_4$ ) со стабилизированным коэффициентом усиления  $K=100$  поступает на катодный повторитель ( $L_{46}$ ), выход которого в промежутках между сигналами также закорачивается на землю с помощью контактов поляризованного реле  $F_3$ .

Поскольку сигнал я.м.р.  $v(\omega)$  при периодической развертке частоты в.ч. генератора является периодической функцией времени  $v(t)$  с периодом  $T$ , равным периоду частоты сети, он может быть представлен рядом Фурье, причем коэффициент Фурье



а)

Сигнал я.м.р., усиленный  $\approx$  в 30 раз.



б)

Тот же сигнал я.м.р. на фоне дуги.

Рис.15.

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T v(t') dt'$$

представляет постоянную составляющую этой функции, которая может быть зарегистрирована прибором постоянного тока, например, самописцем ЭПП-09, как в нашем случае.

Отношение показаний ЭПП-09 при наблюдении усиленного сигнала я.м.р. и сигнала в тепловом равновесии дает нам величину измеренного коэффициента увеличения поляризации

$$E_{\text{изм.}} = \frac{\text{показание ЭПП-09 (усил.)}}{\text{показание ЭПП-09 (не усил.)}} = \frac{\int_0^T v_{\text{усил.}}(t') dt'}{\int_0^T v_{\text{неусил.}}(t') dt'}$$

Величина  $\frac{v(\omega^*)}{V_0} = \frac{V_0 - V^*}{V_0}$ , необходимая для вычисления поляризации по формуле (7), может быть получена следующим образом:  $V_0$  контролируется на пульте управления дублирующим стрелочным прибором, включенным в цепь детектора на выходе усилителя высокой частоты. Включив развертку частоты, подстроив контур я.м.р. и плавно изменяя магнитное поле, можно заметить изменение  $v(\omega^*) = V_0 - V^*$  для усиленных сигналов. Измеренная таким образом величина  $\frac{v(\omega^*)}{V_0}$  в нашем случае находилась в пределах  $0,2 \pm 0,27$  в зависимости от степени поляризации.

Для аналогового интегрирования использовался один из четырех решающих усилителей базового блока электронной моделирующей установки ЭМУ-8. Постоянная времени RC была равна 0,1 сек. Результат интегрирования записывался самописцем ЭПП-09.

Переключатель  $\Pi_1$  ставится в положение 3, при этом управление работой реле  $P_1$ ,  $P_2$  и вспомогательных реле  $P_4$ ,  $P_5$  и  $P_6$  осуществляется от трех одновибраторов ( $L_5$ ,  $L_6$ ,  $L_7$ ).

Импульсом от пересчетного прибора ПС-64, на вход которого подано переменное напряжение с частотой сети, одновременно запускаются два одновибратора ( $L_6$  и  $L_7$ ), а одновибратор ( $L_5$ ) запускается задним фронтом импульса одновибратора ( $L_6$ ). Таким образом, сначала контак-

ты реле  $P_5$  закорачивают на  $\approx 10$  мсек конденсатор интегратора, уничтожая заряд, полученный от предыдущего сигнала. Затем срабатывают реле  $P_1$ ,  $P_2$  и  $P_4$ , и на 10 мсек происходит развертка частоты в.ч. генератора, формируется компенсирующая дуга и сигнал я.м.р. с выхода усилителя ( $L_3$ ,  $L_4$ ) поступает через контакты реле  $P_4$  на интегратор. Длительность импульса одновибратора ( $L_7$ ) подбирается такой, чтобы реле  $P_6$  отключало ЭПП-09 на время, пока происходит разряд конденсатора в интеграторе и развертка частоты. Перо самописца при этом остается на месте, сохраняя показания от предыдущего сигнала.

Запуск схемы от ПС-64 вызван тем, что в экспериментальном зале синхроциклотрона всегда имеются электрические наводки с частотой сети, которые к тому же могут изменяться день ото дня; полностью от них избавиться не удастся. Поэтому запуск развертки частоты в.ч. генератора в произвольные моменты времени приводит к разбросу показаний интегратора (до  $10 \pm 15\%$ ) даже в случае значительно усиленных сигналов я.м.р.

При запуске от ПС-64 (т.е. синхронно с частотой сети, с пересчетом 1:64) вклад от наводки становится постоянным и легко может быть учтен вычитанием.

При интегрировании неусиленного сигнала к разбросу показаний приводят также механические вибрации кристата, вызванные работой механических насосов, мотор-генераторов и т.п. В этом случае целесообразно, выключив тумблер  $P_2$ , производить накопление сигнала, например, за 100 проходов, с последующим его усреднением.

Величина поляризации также может быть вычислена по формуле (7), с введением той же поправки.

Только что описанный способ наблюдения сигналов я.м.р. хотя и не был основным в наших экспериментах, тем не менее может быть полезным для переработки этих сигналов в дискретную форму (число импульсов) с последующим введением в электронно-вычислительную машину вместе с другой информацией об эксперименте.

Для записи производной сигнала я.м.р. переключатель  $P_2$  ставится в положение 4, при этом включается моторное реле, контакты которого размыкаются на 40 секунд через каждые 1,5 минуты. К напряжению раз-



вертки частоты, получающемуся при заряде конденсатора большой емкости  $C'_1 \approx 2000,0$  мкф, прикладывается переменное напряжение с частотой 170–300 герц от внешнего звукового генератора типа ЗГ-2, вызывающее дополнительную частотную модуляцию в.ч. генератора (вместо модуляции магнитного поля, которое стабилизировано по я.м.р.). Глубина модуляции устанавливается меньше ширины линии я.м.р.

Сигнал с выхода  $Q$ -метра усиливается избирательным усилителем типа У2-6 (или В6-4), настроенным на частоту модуляции, и поступает на синхронный детектор СД-1, к выходу которого подключен ЭПП-09.

Контур я.м.р., как всегда, настраивается на среднюю частоту в.ч. генератора.

Однако хорошо известно, что в случае частотной модуляции в.ч. генератора  $Q$ -метра на выходе последнего всегда имеется напряжение с частотой модуляции, когда настройка контура я.м.р. не совпадает с частотой генератора. Поэтому на ленте самописца нулевая линия будет записываться в виде дуги, повторяющей форму вершины резонансной кривой контура я.м.р. Амплитуда этой дуги мала по сравнению с амплитудой производной усиленного сигнала, но она несколько больше амплитуды производной неусиленного сигнала.

Кроме того варикап в контуре я.м.р., оказавшийся весьма полезным при дистанционном управлении  $Q$ -метром, является все же нестабильным элементом, и это приводит к нестабильности настройки контура, что, в свою очередь, вызывает дрейф нулевой линии на ленте. К дрейфу нулевой линии приводят также вибрации криостата, воздействующие в основном на коаксиальный кабель, проходящий внутри него. Дуга и особенно дрейф нулевой линии затрудняют надежную запись производной неусиленного сигнала я.м.р.

Их влияние в значительной мере устраняется применением несложной системы автоматической подстройки контура (а.п.к.), схема которой приведена на рис. 16.

Работает а.п.к. обычным образом: небольшое напряжение с частотой 5 кГц от генератора ( $L_{1a}$ ) подается вместе с постоянным напряжением на варикап контура я.м.р., вызывая небольшую модуляцию его собственной частоты. Если среднее значение последней не совпадает с частотой

генератора, то на выходе  $Q$ -метра появляется напряжение с частотой 5 кгц, амплитуда и фаза которого зависят от величины и направления расстройки контура. Это напряжение, усиленное избирательным усилителем У2-6 (или В6-4), настроенным на частоту 5 кгц, подается на синхронный детектор ( $L_{3a}$ ,  $L_{3б}$ ,  $L_1$  и  $L_2$ ), в котором вырабатывается сигнал ошибки, вводимый в нужной фазе в цепь варикапа. Таким образом, а.п.к. обеспечивает следование настройки контура за частотой в.ч. генератора. При а.п.к. уменьшается также влияние дисперсии  $\chi'(\omega)$ , которая, как известно, вызывает перестройку контура я.м.р., искажая форму наблюдаемых сигналов поглощения или испускания.

Метод наблюдения и записи производной сигнала я.м.р. с помощью синхронного детектирования несмотря на высокую чувствительность для измерения поляризации все же неудобен, так как требует применения двойного интегрирования. Нами этот метод применялся только при поисковых экспериментах по д.п.п.

А.п.к. успешно применялась также при наблюдении сигналов я.м.р. в режиме 2 и 3, при этом, помимо уменьшения влияния дисперсии  $\chi'(\omega)$ , значительно повышалась стабильность работы  $Q$ -метра, что очень важно при непрерывных многочасовых наблюдениях.

Правда, в этих случаях на экране осциллографа вместо дуги наблюдается наклонная линия, поскольку добротность контура я.м.р. с варикапом несколько возрастает к концу развертки частоты в.ч. генератора. Площадь под этой наклонной линией в несколько раз меньше площади под дугой, и она легко компенсируется той же самой схемой компенсации в б.у.

#### 8. Быстрый реверс поляризации <sup>х)</sup>

Для того чтобы сократить время перехода от одного знака поляризации к другому, которое в нашей мишени составляло 45-50 минут, была предпринята попытка реверсировать динамически увеличенную поляриза-

---

<sup>х)</sup> Разработка способа быстрого реверсирования поляризации производилась совместно с аспирантом Московского физико-технического института Шустером А. Л.

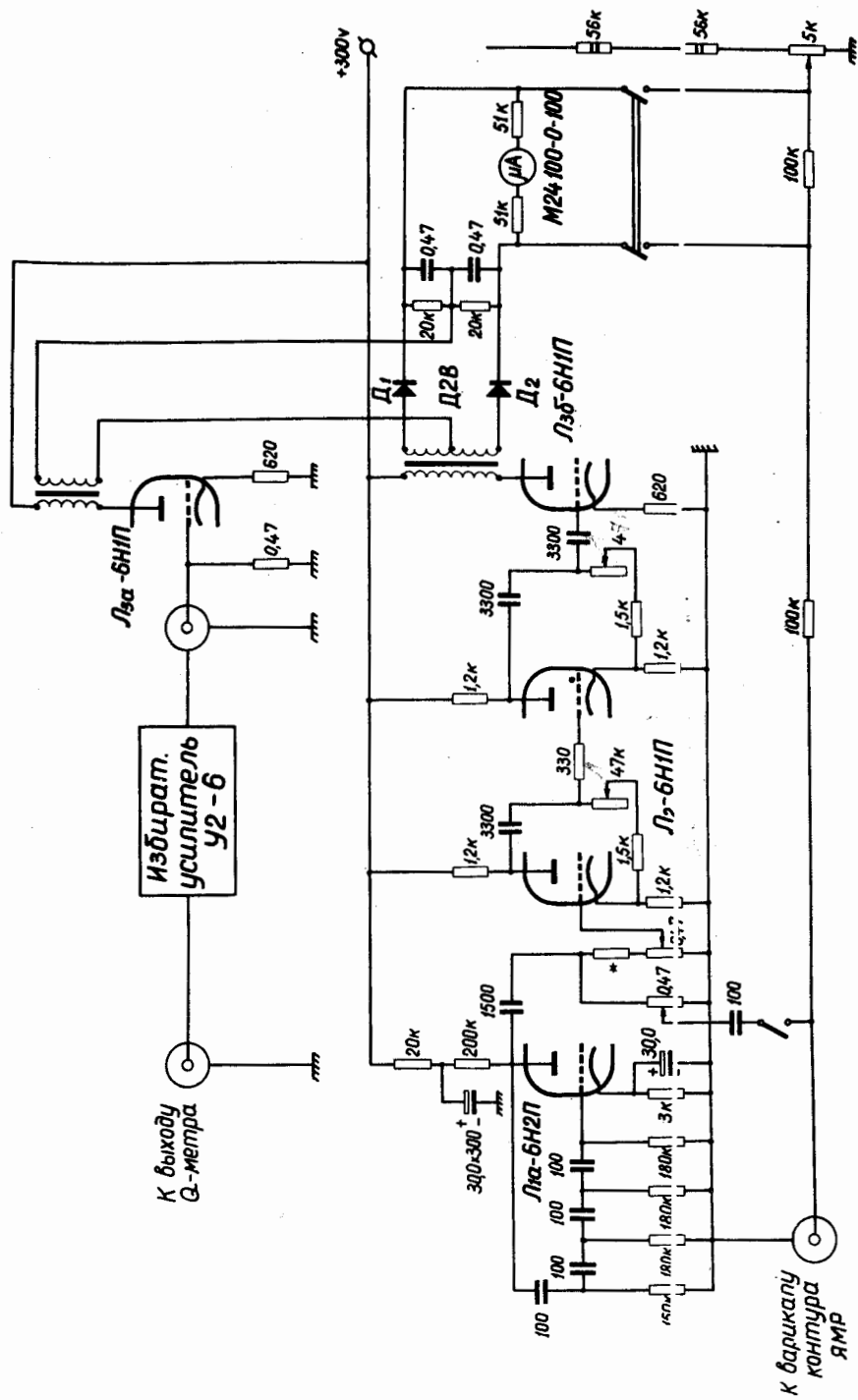


Рис.16. Схема автоматической подстройки контура я.м.р.

цию в LMN метсдом быстрого адиабатического прохождения линии я.м.р.

Как известно если воздействовать на систему магнитных моментов сильным радиочастотным полем  $H_1$  с частотой  $\omega$  и при этом, изменяя магнитное поле  $H_0$  ( или  $\omega$  при фиксированном  $H_0$  ), пройти через я.м.р., то вектор намагниченности (поляризация) повернется на  $180^\circ$ , если скорость прохождения  $\frac{dH_0}{dt}$  ( или  $\frac{1}{\gamma} \frac{d\omega}{dt}$  ) удовлетворяет условию

$$\frac{1}{T_1}, \frac{1}{T_2} \ll \frac{1}{H_1} \frac{dH_0}{dt} \ll \gamma H_1,$$

т.е. прохождение должно быть совершено за время, значительно меньшее по сравнению с временами релаксации  $T_1$  и  $T_2$ .

Однако в твердом теле, имеющем очень короткое время релаксации  $T_2$ , это условие практически не выполнимо. Тем не менее, реверсирование вектора намагниченности при быстром адиабатическом прохождении имеет место при менее жестких условиях

$$\frac{1}{T_1} \ll \frac{1}{H_1} \frac{dH_0}{dt} \ll \gamma H_1,$$

причем  $H_1$  должно быть больше некоторого "локального" поля  $H_L$ .

Объяснение этого факта, основанное на гипотезе существования спиновой температуры во вращающейся системе координат, дано в /10/, гл. XII. В /11/ рассмотрены причины, которые могут вызывать потерю намагниченности (поляризации) при быстром адиабатическом прохождении линии я.м.р.

Поскольку поляризованная мишень была занята в экспериментах на ускорителе, большинство опытов по реверсу поляризации производилось на другой установке, в магнитном поле напряженностью 10 кэ. Блок-схема установки показана на рис. 17.

Для наблюдения сигналов я.м.р. использовался такой же Q - метр, но настроенный на частоту 42,5 мггц, с тем же самым блоком управления.

Кристалл LMN объемом в  $1 \text{ см}^3$  был помещен вместе с радиокапсушкой из 6 витков в цилиндрический микроволновой настраиваемый ре-



резонатор диаметром 28 мм, длиной 50 мм. Микроволновое поле в резонаторе возбуждалось от стандартного с.в.ч. генератора типа ГЗ-30. Благодаря настройке резонатора мощности ГЗ-30 было достаточно для получения поляризации  $\approx 30\%$ . В описываемых опытах применялось частотное прохождение.

Процедура реверса выполнялась следующим образом: с помощью коаксиального переключателя кабель от катушки я.м.р. подключался к выходному контуру мощного генератора ( $L_1 L_2$ ); переключатель  $P_1$  на б.у. устанавливался в положение 1, и нажатием кнопки "реверс" включалось самоблокирующееся реле  $P_7$ . При этом одновременно с началом заряда конденсатора  $C^*$  запускался одновибратор ( $L_8$ ). Прямоугольный импульс с последнего поступал на третью сетку нормально закрытой лампы  $L_{12}$  в Q-метре, открывая ее. Напряжение заряда конденсатора обычным образом подавалось на варикап контура в.ч. генератора. Его напряжение через катодный повторитель ( $L_{1П}$ ) и открытую на время импульса лампу  $L_{12}$  подводилось к стандартному широкополосному усилителю (УР-4) и затем - на вход мощного генератора ( $L_1 L_2$ ), к выходу которого уже подключена радиокатушка с образцом.

Емкость конденсатора  $C^*$  определяла скорость изменения частоты  $\frac{d\omega}{dt}$ , а длительность импульса одновибратора подбиралась такой, чтобы в.ч. напряжение поступало на радиокатушку только на время прохождения линии я.м.р. Такой способ подачи в.ч. напряжения был вызван тем, что при большой егс величине (до 200-300 вольт) происходит "стирание" сигнала, когда частота  $\omega(t)$  только подходит к линии я.м.р.

К сожалению, нам не удалось установить связь между в.ч. напряжением  $V_k$  на верхнем конце кабеля и напряженностью радиочастотного поля  $H_1$ .

Были исследованы:

1) зависимость доли переворачиваемой амплитуды усиленного сигнала я.м.р. от скорости прохождения  $\frac{d\omega}{dt} \approx \frac{1}{C^*}$  при различных величинах в.ч. напряжения  $V_k$ . Результаты представлены на рис. 18, где точки, относящиеся к одному и тому же напряжению  $V_k$ , соединены от руки для наглядности;

2) зависимость доли переворачиваемой амплитуды усиленного сигнала я.м.р. от величины в.ч. напряжения  $V_k$  при оптимальной скорости прохождения. Результат представлен на рис. 19.

В обоих случаях начальная поляризация была положительной. Из рис. 19 видно, что при напряжении  $V_k \approx 230$  вольт и скорости прохождения  $\approx 100 \frac{\text{МГц}}{\text{сек}}$  происходит практически полное реверсирование положительной поляризации в отрицательную.

Реверсирование отрицательной поляризации происходило хуже, так, например, при напряжении  $V_k = 300$  вольт доля перевернутой амплитуды сигнала я.м.р. составляла только 0,6 с учетом нелинейности  $Q$  - метра и не зависела от направления прохождения. Причина этого нами пока не выяснена.

### З а к л ю ч е н и е

Ко времени написания настоящей статьи, на поляризованной мишени успешно выполнен эксперимент по измерению параметра деполяризации  $D$  в упругом  $p$ - $p$  рассеянии при энергии протонов 660 Мэв <sup>/12/</sup>.

Применение автоматической подстройки частоты с.в.ч. генератора и вышеописанного способа управления магнитным полем позволило не производить поисков "запрещенных" переходов э.п.р. в начале каждого сеанса работы, а сразу после получения температуры 1°К устанавливать необходимое значение магнитного поля, после чего максимальная поляризация  $\approx 70\%$  достигалась через 30-35 минут. При этом в кристате рассеивалось  $\approx 350$  мвт с.в.ч. мощности (по испаряющемуся гелию) при мощности с.в.ч. генератора около 1 вт.

Вследствие радиационных повреждений, производимых пучком протонов в кристаллах LMN, заметно укорачивалось время релаксации  $T_1$ . При отогреве до комнатной температуры  $T_1$  частично восстанавливалось. Так, например, в кристаллах, имевших начальное время релаксации  $T_1 \approx 60$  минут, после пяти сеансов облучения, проводившихся через неделю,  $T_1$  сократилось вдвое, причем за каждый сеанс через мишень проходило  $\approx 5 \cdot 10^{11}$  протонов. Тем не менее такое укорачивание

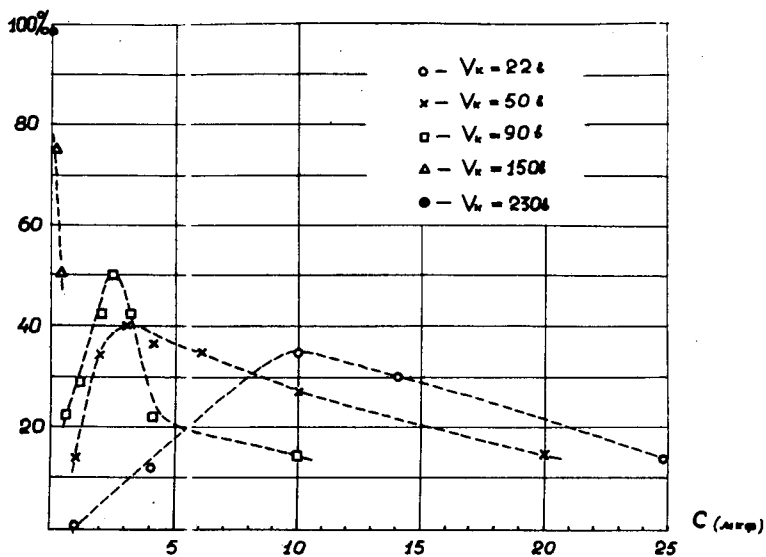


Рис.18. Зависимость доли переворачиваемой амплитуды сигнала я.м.р. от скорости прохождения  $\frac{d\omega}{dt} \approx \frac{1}{C^*}$  при различных значениях в.ч. напряжения  $V_k$ .

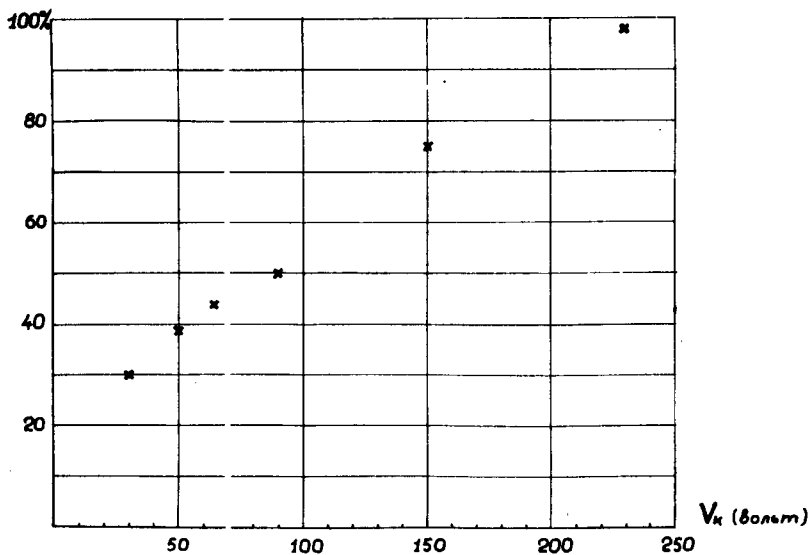


Рис.19. Зависимость доли переворачиваемой амплитуды сигнала я.м.р. от величины в.ч. напряжения  $V_k$ .



времени релаксации на величину максимальной поляризации не повлияло.

В заключение авторы считают своим приятным долгом выразить искреннюю благодарность А.С. Акимову, А.К. Лепуну, И.З. Крахтинову, А.О. Орлову, О.Н. Щевелеву, принимавшим участие в создании и эксплуатации поляризованной мишени, С.Л. Смирновой, вырастившей высококачественные кристаллы LMN, профессору Ф.Л. Шапиро за проявленный интерес к опытам по реверсу поляризации и весьма ценные советы, а также М.Ю. Либургу, помогавшему в этих опытах.

#### Л и т е р а т у р а

1. К. Джеффис. Динамическая ориентация ядер, "Мир", 1965 г.
2. Д.П. Василевская, Л.В. Васильев, Ю.Н. Денисов. Преприят ОИЯИ Р-1475, Дубна 1963 год.
3. Парфенов Л.Б. Улучшение метода стабилизации магнитного поля, основанного на явлении ЯМР при наличии опорного генератора высокочастотного напряжения с кварцевой стабилизацией". ОИЯИ, Рац. предложение №2574 1966 год.
4. S.J.Laredo "Low-Loss Transmission in Rectangular Waveguide" British Communications & Electronics Oct. 1962 vol 9 N10 p738.
5. С.И. Бычков, Н.И. Буренин, Р.Т. Сафаров. Стабилизация частоты генераторов СВЧ". "Советское радио" 1962 год.
6. А. Леше "Ядерная индукция". "ИИЛ", 1963 год.
7. V.Petricek et M.Odehnal "Analyse du Q-metre utilise pour de mesures de polarisation". Nucl.Instr. and Meth. 52 (1967) 197-205
8. С.К. Алексеев. "Расчет оптимальных вариантов многокаскадных усилителей". "Энергия", 1965 год.
9. М.Л. Волин. "Паразитные связи и наводки". "Советское радио" 1960 г.
10. А. Абрагам. "Ядерный магнетизм". "ИИЛ", 1963.

11. M. Goldman, M. Chapellier, Vu Hoang Chan. "Nuclear magnetic resonance single-shot passage in solids".  
Preprint Saclay.

12. И. Быстрички, Я. Чех, З. Яноут, Ю. М. Казаринов, Ф. Легар, Л. Б. Парфенов. Препринт ОИЯИ, Р1-3971, Дубна, 1968 г.

Рукопись поступила в издательский отдел  
5 ноября 1968 года.