

5-27  
Д-332

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

ЛД

13-3218-1



Ю.Н. Денисов, С.А. Ивашкевич

ЯДЕРНЫЕ МАГНИТОМЕТРЫ  
С ДИСТАНЦИОННЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

1967.

13-3218-1

4942/6 нр.

Ю.Н. Денисов, С.А. Ивашкевич

**ЯДЕРНЫЕ МАГНИТОМЕТРЫ  
С ДИСТАНЦИОННЫМ УПРАВЛЕНИЕМ**

Направлено в журнал "Измерительная техника"

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО  
ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ  
И МЕТРОЛОГИИ  
БИБЛИОТЕКА

В последнее время ядерные магнитометры получают все большее распространение как наиболее удобные приборы, позволяющие с высокой точностью измерять абсолютную величину стационарных магнитных полей в диапазоне от  $10^{-5}$  до  $(2 \div 5)$  тл. Разработан и описан ряд лабораторных <sup>/1-7/</sup> и промышленных <sup>/8 /</sup> образцов ядерных магнитометров. Однако широкий диапазон задач, решаемых с помощью этих приборов, и, как следствие, разнообразие требований, предъявляемых измерителям магнитного поля различными частными условиями эксплуатации, обуславливают необходимость дальнейших разработок новых модификаций магнитометров, основанных на этом принципе измерений. В настоящей работе описывается два относительно универсальных образца ядерных магнитометров, предназначенных для измерения магнитных полей как в небольших электромагнитах, так и, в основном, в магнитах с диаметром полюсных наконечников, достигающим нескольких метров. Такие электромагниты с объемом создаваемых магнитных полей до десятков кубических метров широко используются в экспериментальной ядерной физике и ускорительной технике.

Блок-схема разработанных магнитометров показана на рис.1. Специфика использования приборов для измерения магнитных полей больших электромагнитов предопределила размещение автодинного детектора ЯМР и некоторых других узлов магнитометра в отдельном, небольшом по размерам, блоке-датчике, который может вноситься непосредственно в измеряемое магнитное поле. Остальная же часть магнитометра - блок индикации с источниками питания - располагается на достаточном удалении от измеряемого поля. Естественно, что при выбранной компоновке прибора было бы крайне нежелательно, чтобы какие-либо органы управления автодинным детектором ЯМР располагались в датчике. Все они должны быть вынесены в блок индикации прибора. В соответствии с этим требованием и выбирались как схема автодина, так и способы регулирования частоты и амплитуды генерируемого высокочастотного напряжения.

Были разработаны два вида ядерных магнитометров, отличающихся только способом регулирования частоты автодина. Принципиальная схема первого прибора (ЯМ-1) показана на рис. 2. Автодин выполнен по схеме емкостной трехточки. Проведенное рядом авторов сравнение характеристик наиболее широко используемых автодинных детекторов ЯМР, выполняемых по схемам с катодной связью и емкостной трехточки /2,9/, показало некоторые преимущества последней схемы. Частота генерации автодина регулируется двумя способами: грубо - сдвоенным воздушным конденсатором с приводом от специального небольшого электродвигателя постоянного тока; плавно - изменением управляющего напряжения на варикапе, подключенном через небольшую емкость параллельно резонансному контуру. Коэффициент перекрытия по частоте, достигаемый при помощи воздушного конденсатора, составляет  $\approx 2$ . Варикапом производится только плавная подстройка частоты в диапазоне  $\approx 1 \div 3\%$ .

Во втором образце магнитометра (ЯМ-2), в отличие от первого, частота автодина регулируется только при помощи варикапов. Принципиальные схемы узлов прибора, претерпевших в связи с этим некоторые изменения, показаны на рис. 3. Недостатком такого регулирования частоты является довольно сильная, особенно при малых управляющих напряжениях на варикапах, зависимость частоты от уровня генерации автодина. Однако применение в описываемых магнитометрах системы стабилизации уровня генерации позволяет практически полностью устранить влияние этого эффекта на процесс измерений.

Коэффициент перекрытия по частоте, получающийся при помощи варикапов, равен  $1,3 \div 1,5$ .

Полный диапазон магнитных индукций, измеряемых первым прибором, составляет  $4,2 \cdot 10^{-2} \div 2,50$  тл. Для второго магнитометра он несколько уже:  $8,0 \cdot 10^{-2} \div 2,4$  тл. В обоих приборах диапазон измеряемых полей разбит на ряд поддиапазонов, переключение которых производится заменой контурных катушек  $L_1$ , размещенных в легко съемных сменных вставках датчика. Параметры катушек  $L_1$  для каждого поддиапазона приведены в табл 1.

Т а б л и ц а 1

№№ под-диапазонов	ЯМ - 1			ЯМ-2				
	Диапазон полей, тл	Диаметр ампулы, мм	Индуктивн., мкГн	Тип и диам. провода	Диапазон полей, тл	Диаметр ампулы, мм	Индуктивн., мкГн	Тип и диаметр про- вода
1.	0,042-0,09	7,5	99	ПЭЛ	0,05 0,079-0,11	7,0	69	ПЭЛ 0,06
2.	0,8-0,17	6,3	23,3	ПЭЛ	0,06 0,1-0,15	6,5	37,8	ПЭЛ 0,06
3.	0,16-0,34	3,7	7	ПЭЛ	0,06 0,13-0,19	6,0	25,2	ПЭЛ 0,06
4.	0,29-0,65	2,2	1,98	ПЭЛ	0,06 0,186-0,27	4,5	12,48	ПЭЛ 0,08
5.	0,53-1,22	1,8	0,58	ПЭЛ	0,07 0,25-0,37	4,2	6,85	ПЭЛ 0,06
6.	1,09-2,59	1,6	0,124	ПЭЛ	0,1 0,36-0,52	3,5	3,5	ПЭЛ 0,07
7.					0,52-0,72	2,6	1,85	ПЭЛ 0,08
8.					0,69-1,03	2,0	0,925	ПЭЛ 0,08
9.					0,91-1,38	2,0	0,5	ПЭЛ 0,1
10.					1,35-2,0	1,7	0,254	ПЭЛ 0,1
11.					1,6-2,47	1,7	0,163	ПЭЛ 0,1

Все контурные катушки наматываются непосредственно на стеклянные запаянные ампулы, наполненные 0,1 + 0,2 N раствором  $Fe(NO_3)_3$  в воде. При такой концентрации раствора ширина резонансной линии в однородном магнитном поле составляет  $\approx 3 \cdot 10^{-5}$  тл. Зависимость амплитуды резонансного сигнала от уровня генерации для нескольких поддиапазонов показана на рис. 4. Из этой серии графиков следует, что оптимальные амплитуды высокочастотного напряжения на контуре автодина  $U_{\text{опт}}$  несколько отличаются для разных поддиапазонов и лежат в пределах 0,5 + 6в. Внутри каждого поддиапазона  $U_{\text{опт}}$  почти неизменна.

Для поддержания оптимальных условий детектирования ЯМР, особенно в

режиме поиска резонансного сигнала, установленный уровень генерации автодина при перестройке частоты поддерживается почти неизменным системой стабилизации высокочастотного напряжения на контуре автодина. Схема стабилизации  $U_{вч}$  работает следующим образом. Высокочастотное напряжение с катода генераторной лампы, равное приблизительно половине  $U_{вч}$ , детектируется диодным детектором. Постоянное напряжение с выхода детектора подается на индикатор уровня генерации (микроамперметр М130) и на сетку лампы  $L_2$ , работающей в режиме дискриминатора уровня входного сигнала за счет регулируемого смещения в цепи катода. Напряжение смещения этой лампы может изменяться от 0 до 3в потенциометром  $R_2$ . Анодное напряжение на генераторную лампу  $L_1$  подается со стабилизированного выпрямителя через регулируемую лампу  $L_3$ , режим которой задается управляющей лампой  $L_2$ . Если напряжение на сетке лампы  $L_2$   $U_{с2}$  меньше напряжения на катоде  $U_{к2}$ , то управляющая лампа закрыта, регулирующая - открыта и на анод генераторной лампы поступает практически полное напряжение источника ( $\approx 240$ в). При  $U_{с2} > U_{к2}$ , наоборот, напряжение на аноде автодина  $U_a$  уменьшается до 20 + 30 в. Уровень анодных напряжений при оптимальных для детектирования ЯМР амплитудах  $U_{вч}$ , естественно, зависит от диапазона генерируемых автодином частот, однако с точки зрения достижения максимальной чувствительности автодина желательно  $U_a$  на всех частотах поддерживать в диапазоне 30 + 120 в. Это можно сделать подбирая для каждого поддиапазона соответствующую величину катодного сопротивления  $R_1$  генераторной лампы  $L_1$ . Оптимальные сопротивления  $R_1$  размещаются вместе с  $L_1$  в сменных вставках датчика и заменяются одновременно с контурными катушками. Приблизительные величины  $R_1$  для обоих типов датчиков приведены в табл.2

Таблица 2

№№ поддиапа- зонов $R_1$ ком	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	ЯМ-1	13	13	5,1	3,0	3,0	0,82				
ЯМ- 2	85	75	56	43	36	15	9,1	5,6	2,4	0,15	0,027

На рис.5 показана зависимость уровня генерации автодина от частоты для двух поддиапазонов при включенной и выключенной системе стабилизации амплитуды генерируемого высокочастотного напряжения. С системой стабилизации

У  $\Delta$   $\tau$  меняется не более чем в два раза, что вполне допустимо и позволяет внутри каждого поддиапазона измерять любое значение магнитной индукции без регулировки уровня генерации. Как указывалось, это особенно важно для датчиков с перестройкой частоты при помощи варикапов. Без этой системы их применение практически невозможно.

Кроме автодинного детектора ЯМР, в датчике магнитометра размещаются: катушки, создающие модулирующее магнитное поле; первый каскад низкочастотного тракта усиления резонансного сигнала; составной эмиттерный повторитель, согласующий малое входное сопротивление кабеля, по которому высокочастотный сигнал подводится к автоматическому электронно-счётному частотомеру, с большим выходным сопротивлением автодина; и, в первом образце прибора, электро-механический привод двойного воздушного конденсатора.

Модулирующие катушки питаются от одной из обмоток силового трансформатора прибора. Амплитуда модулирующего поля регулируется потенциометром  $R_3$  в диапазоне от 0 до 50 мВ.

Предварительный низкочастотный усилитель собран на второй половине двойного триода 6Н16Б, причём для уменьшения числа жил в соединительном кабеле его анодная нагрузка расположена в блоке индикации.

В согласующем эмиттерном повторителе используются высокочастотные транзисторы типа ГТ311А.

Частотная характеристика и зависимость входного сопротивления эмиттерного повторителя от частоты показаны на рис. 6. Минимальный коэффициент передачи в диапазоне частот 1-100 МГц равен 0,8.

Качество работы ядерных магнитометров (получаемое в процессе измерений отношение сигнал/шум) в значительной степени зависит от конструктивного исполнения датчиков. На рис.7 показаны оба типа датчиков с открытыми верхними крышками. Конструкция вставок, показанных на этом рисунке, одинакова для приборов обоих типов.

Для уменьшения габаритов датчика магнитометра ЯМ-1 в нем используются специальные малогабаритные переменные конденсаторы коаксиального типа. Осевое перемещение подвижных пластин конденсаторов производится при помощи

винта, вращающегося через редуктор 1 : 10 безжелезным электромотором постоянного тока, в котором в качестве статорного поля используется измеряемое магнитное поле. Конструкция этого узла показана на рис.8. В результате применения таких конденсаторов важнейший габаритный размер датчика - высота, определяющая минимальный допустимый размер зазора магнитов, в которых поле может измеряться описываемым магнитометром, составляет 23 мм. Число оборотов мотора, а следовательно, и скорость изменения частоты, плавно меняется потенциометром  $R_4$ . Направление вращения мотора задается двуполярным переключателем  $P_3$ . На основании блока переменных конденсаторов установлены концевые выключатели, ограничивающие перемещение подвижных пластин. Схема управления электромотором такова, что при срабатывании одного из концевых выключателей запрещается вращение мотора только в прежнем направлении, но реверсное движение остается разрешенным.

Конструкцией узла привода блока конденсаторов предусматривается возможность и ручной перестройки частоты.

Для этого на конец вала электромотора надевается специальный удлинитель с цапговым захимом, позволяющий вращать мотор вручную. Необходимость в таком управлении возникает при измерении полей в электромагнитах с диаметром полюсных наконечников, меньшим 30 см, поскольку в этом случае электромотор оказывается вне магнитного поля.

Серьезным фактором, влияющим на компоновку датчика, является необходимость размещения в нем нескольких деталей, имеющих ферромагнитные элементы. Такими деталями являются двойной триод 6Н16Б, транзисторы и полупроводниковые диоды с никелевыми выводами. Все эти детали должны быть удалены от намотанной на ампуле контурной катушки на расстояния, практически исключающие влияние вызываемых ими искажений магнитного поля на результаты измерений. Экспериментально было установлено, что при точности измерений  $\sim 3 \cdot 10^{-3} \%$  эти расстояния должны быть не менее 75 мм. В описываемой конструкции датчика лампа удалена от ампулы на 110 мм, ближайший транзистор на 110 мм, диод Д901Б - на 80 мм.

Электрическая схема датчика смонтирована на плате из двустороннего фольгированного стеклотекстолита. В датчиках, показанных на рис.7, монтаж выполнен навесным способом на монтажных штырьках. Для устранения излучения и проникновения в датчик внешних высокочастотных наводок все подводящие про-



водники вводятся в корпус датчика через проходные конденсаторы. Габаритные размеры датчика первого прибора  $204 \times 87 \times 22,6 \text{ мм}^3$ .

Конструкция датчика второго магнитометра, естественно, несколько иная, так как в нём нет блока переменных конденсаторов. Это позволило уменьшить высоту датчика до 18 мм. Другие габаритные размеры соответственно равны  $192 \times 36 \text{ мм}^2$ .

С блоком индикации датчики соединены десятижильным кабелем длиной 7–10 м. В случае необходимости его длина может быть увеличена до нескольких десятков метров.

В блоке индикации магнитометра размещены: низкочастотный усилитель резонансного сигнала; осциллографическая трубка, на которой наблюдается сигнал ЯМР; схема стабилизации уровня генерации, а также органы управления частотой и режимом работы автодина; источники питания всех блоков прибора. В первых двух каскадах низкочастотного усилителя используются триоды с малым уровнем шумов, а два следующих собраны на высоковольтных транзисторах П26Б, поскольку для отклонения луча на весь экран трубки 7Л055И на выходе усилителя необходимо развить амплитуду сигнала до 40 в. Частотная характеристика усилителя резонансного сигнала приведена на рис.9. Максимальный коэффициент усиления всего тракта (включая каскад в датчике) составляет  $\approx 10^6$ . Для повышения чувствительности пластин вертикального и горизонтального отклонения оба анода осциллографической трубки питаются пониженным напряжением  $\approx 600 + 700 \text{ в}$ . Поскольку скорость горизонтальной развертки невелика (синусоидальная развертка с частотой 50 гц), это не приводит к снижению яркости луча. Напряжение на пластины горизонтального отклонения подается с соответствующей обмотки силового трансформатора. Между обмоткой и пластинами включен фазовращатель.

Органы управления датчиком и схема блока питания почти одинаковы для магнитометров обоих типов. Некоторое отличие есть только в органах управления частотой автодинного детектора ЯМР.

Если в первом приборе частота регулируется двумя ступенями: грубо – мотором, плавно – варикапом, то во втором используются только варикапы. Управляющее напряжение на варикапы в этом приборе подается с многооборотного прецизионного потенциометра типа "гелипот". Намоточные данные силовых трансформаторов для обоих приборов приведены в табл.3.

В трансформаторах используютсямотанные сердечники из железа Э330 сечением 5,5 см<sup>2</sup>.

При разработке описываемых магнитометров особое внимание было уделено их конструктивному исполнению, технологичности, воспроизводимости характеристик как отдельных блоков, так и приборов в целом. С этой целью было изготовлено и испытано несколько модификаций датчиков и блоков индикации, а затем в зависимости от результатов их испытаний выбраны наиболее удачные образцы. Таким образом удалось в значительной степени избежать обычной "болезни" лабораторных установок - уникальности, неповторимости их характеристик при копировании.

Таблица 3

№№ обмоток	w <sub>1</sub>	w <sub>2</sub>	w <sub>3</sub> *	w <sub>4</sub>	w <sub>5</sub>	w <sub>6</sub>	w <sub>7</sub>	w <sub>8</sub>	w <sub>9</sub>
Число витков	1570	1000	120	2800	4800	80	1200	650	50
Диаметр провода, мм	0,33	0,1	0,59	0,1	0,1	0,2	0,1	0,13	0,59

\*) В магнитометре ЯМ-2 этой обмотки нет.

№№ кн	w <sub>1</sub>	w <sub>2</sub>	w <sub>3</sub>	w <sub>4</sub>	w <sub>5</sub>	w <sub>6</sub>
Число витков	1570	2400	160	50	50	50
Диаметр провода, мм	0,33	0,13	0,51	0,69	0,59	0,31

Основные характеристики обоих магнитометров приведены в табл.4.

Таблица 4

Параметр	ЯМ -1	ЯМ - 2
Диапазон измеряемых магнитных полей в тл	$5 \cdot 10^{-2} + 2,50$	$8,0 \cdot 10^{-2} + 2,4$
Количество поддиапазонов	6	11
Коэффициент перекрытия по полю внутри каждого поддиапазона	2	1,3 + 1,5
Допустимая неоднородность измеряемого поля в % на 1 см	1%/см	1%/см
Точность измерений при регистрации частоты автодина электронно-счётным частотомером /10/	0,003 + 0,01%	0,003 + 0,01%
Габаритные размеры датчика, высота x ширина x длина в мм	23 x 87 x 204	16 x 36 x 192

На рис. 10 и 11 показаны фотографии приборов и сигналов ЯМР в магнитных полях 0,042 и 1,0 тл (для ЯМ-1) и в полях 0,08 и 1,0 тл (для ЯМ-2).

В заключение авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность А.Н.Кокореву, М.С.Крыловой, Х.Ф.Салахатдинову, И.А. Каплину за помощь при изготовлении приборов.

#### Л и т е р а т у р а

1. Л.И.Герцигер. ПТЭ, №2, 33 (1955).
2. А.В.Кубарев. ПТЭ, №3, 57 (1957).
3. Ю.Н.Денисов. ПТЭ, №5, 67 (1958).
4. Г.К.Ягода, Е.Е.Богатырев. Измерительная техника, №9, 41(1962).
5. А.Г.Гордиенко, И.О.Антоненко. ПТЭ, №4, 144 (1963).
6. А.Н.Маки, R. I. Volpicelli. Rev. Scient. Instr., 36, 325 (1965).
7. Я.А.Зильберштейн, В.И.Зингерман. Исследования в области магнитных измерений. ВНИИМ. Вып.79 (139), стр.56, 1965.
8. А.И.Герцигер. Приборостроение, №5 (1958).

8. V. Kodetek, I. Zejda Преприят UIV 1033/64. Институт ядерных исследований, Прага.

Ю. Ю.Н.Денисов, В.М.Лачинов, Ю.И.Сусов, А.Т.Шяплянников. Автоматический частотомер для ядерных магнитометров. Преприят ОИЯИ, 10 - 2878, Дубна, 1966.

Рукопись поступила в издательский отдел  
13 марта 1967 г.

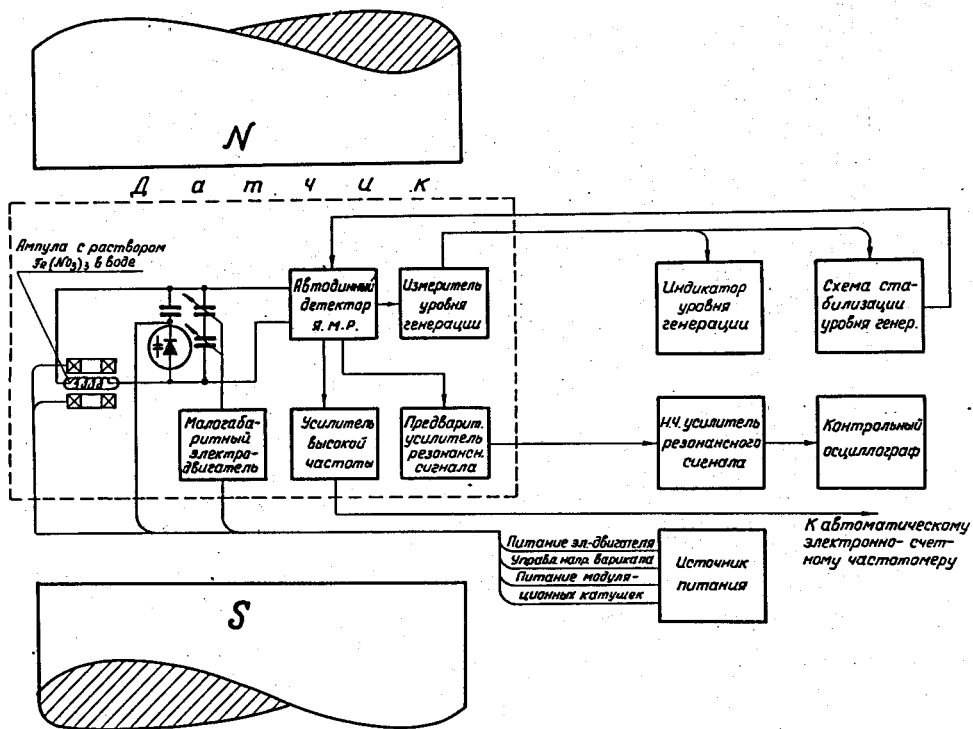


Рис.1. Блок-схема магнитометров.

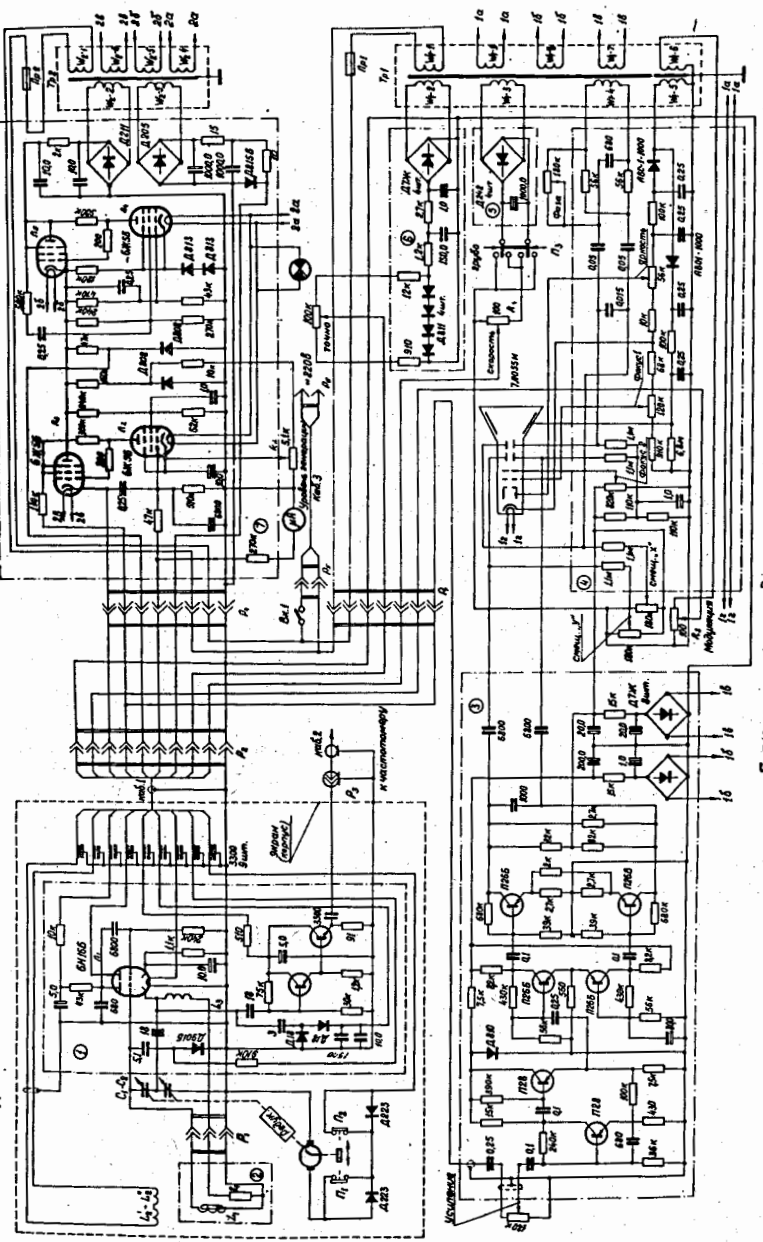


Рис.2. Принципиальная схема магнитометра ЯМ-1.

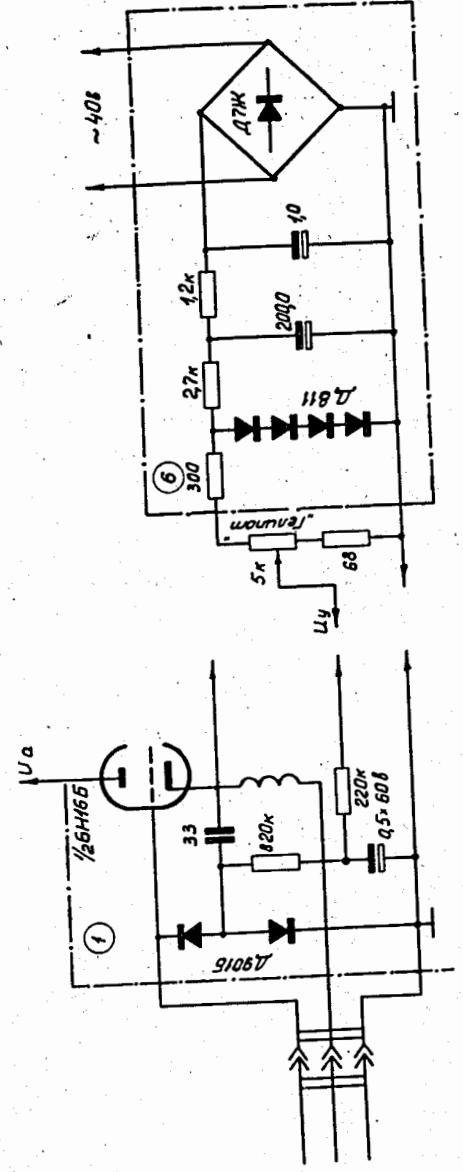


Рис.3. Часть схемы автодина и схема питания варкалов магнитометра ЯМ-2.

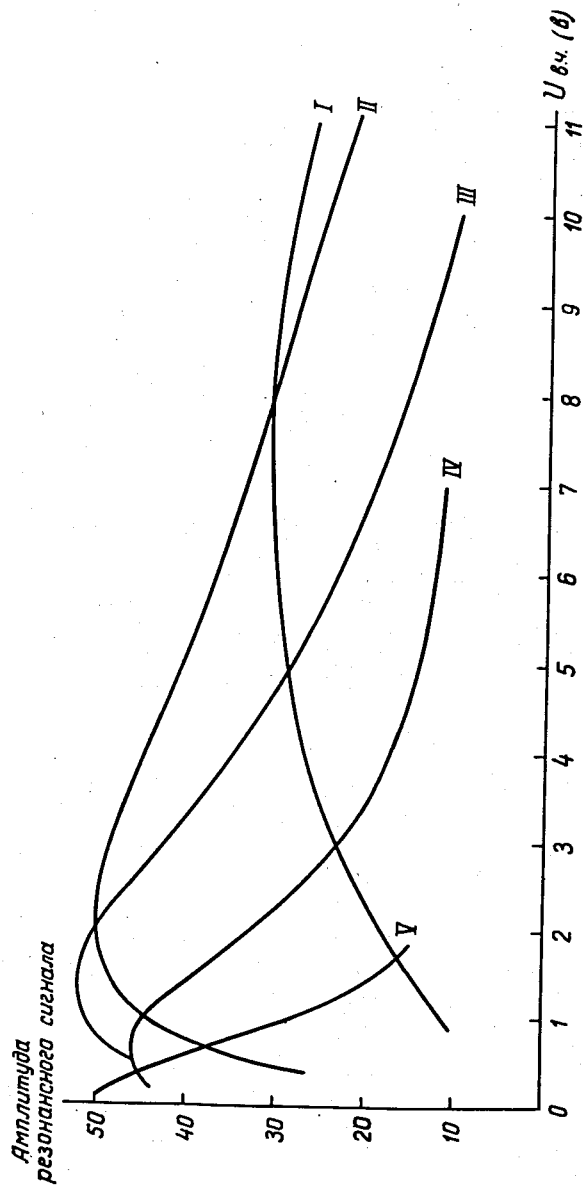


Рис.4. Зависимость амплитуды резонансного сигнала от уровня генерации для пяти поддиапазонов.

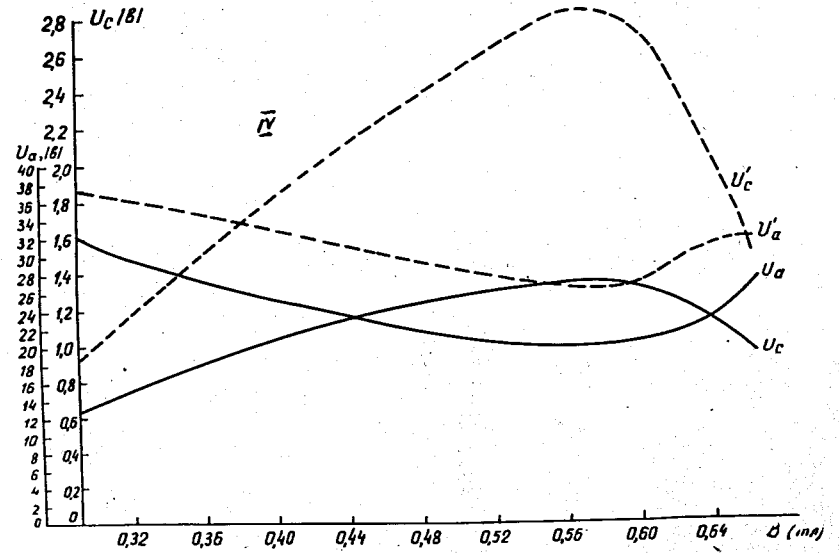
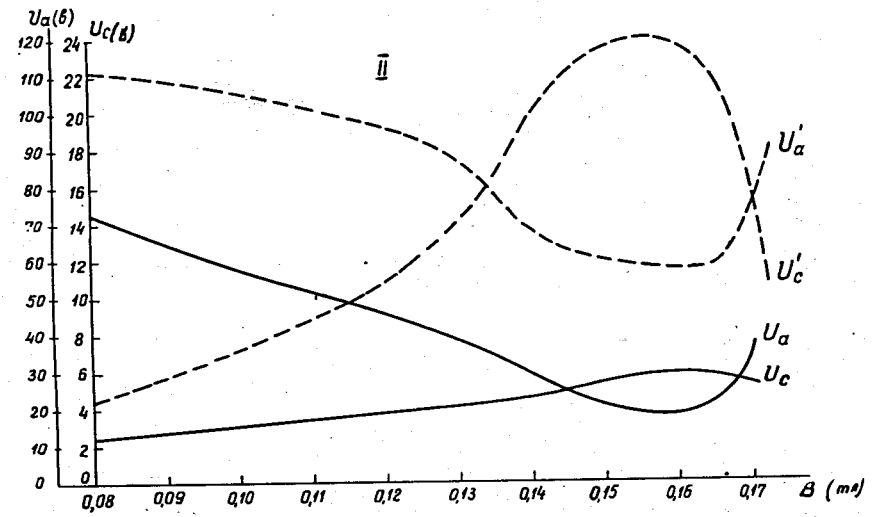


Рис.5. Зависимость высокочастотного напряжения на сетке и постоянного напряжения на аноде генераторной лампы от частоты со стабилизацией уровня генерации ( $U_c, U_a$ ) и без неё ( $U'_c, U'_a$ ).

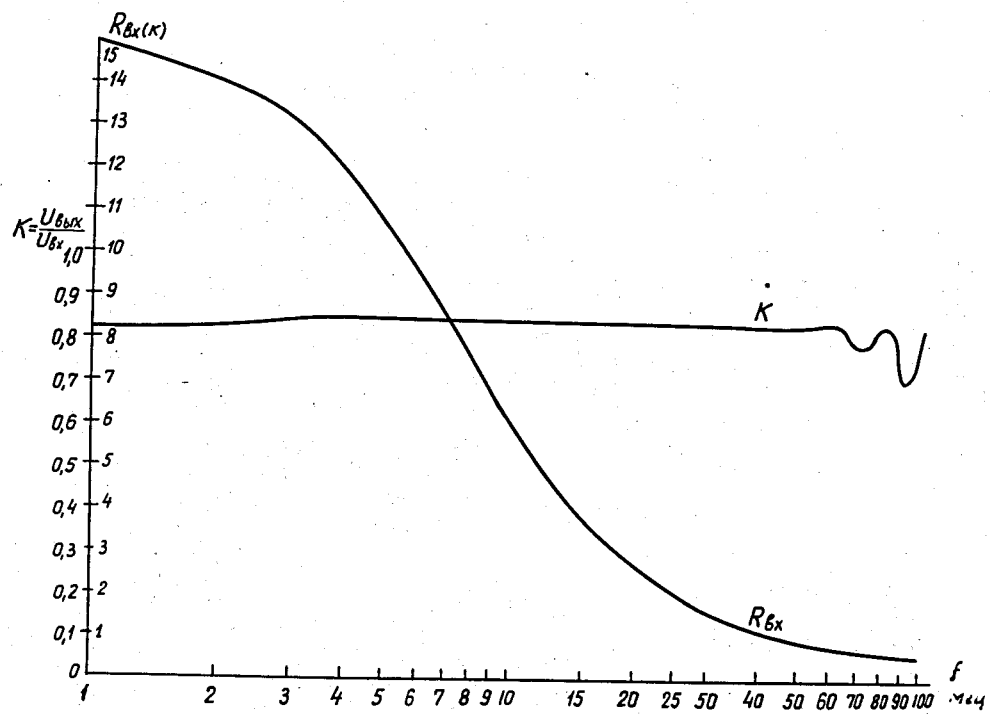
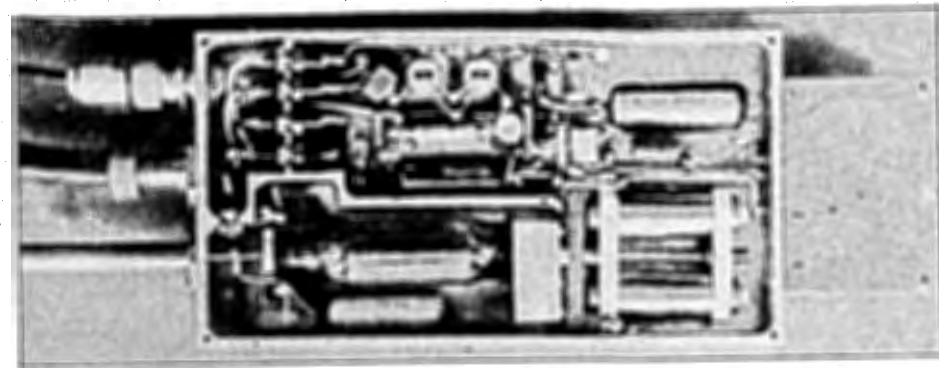
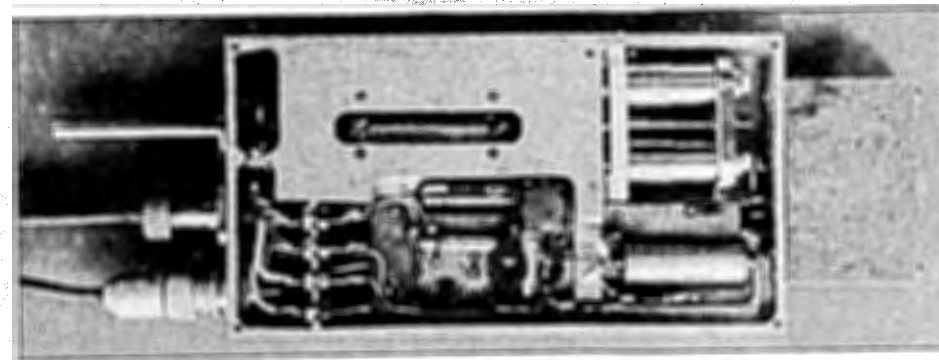


Рис.6. Частотная характеристика эмиттерного повторителя и зависимость его входного сопротивления от частоты.



а



б



в



г

Рис.7. Фотографии датчиков.



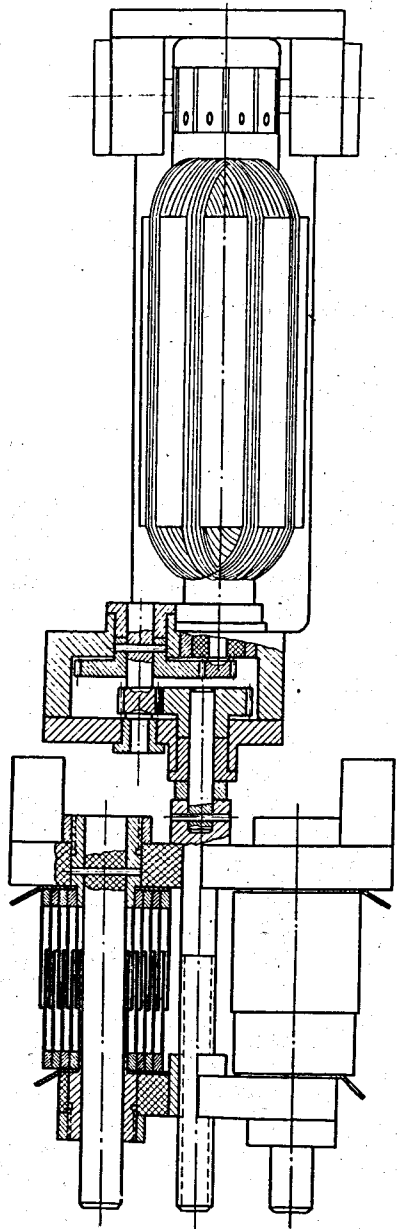


Рис.8. Конструкция блока переменных конденсаторов с электродинамическим и ре-  
дуктором.

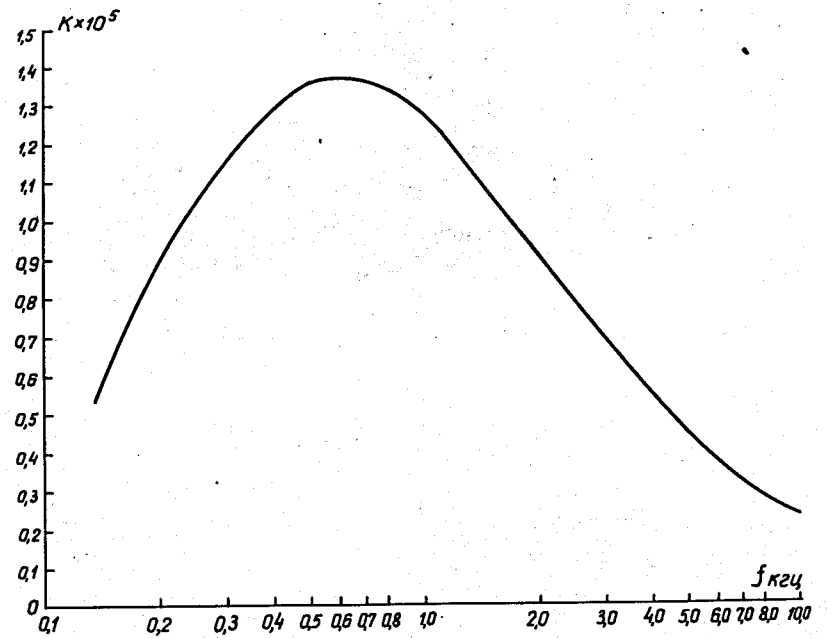
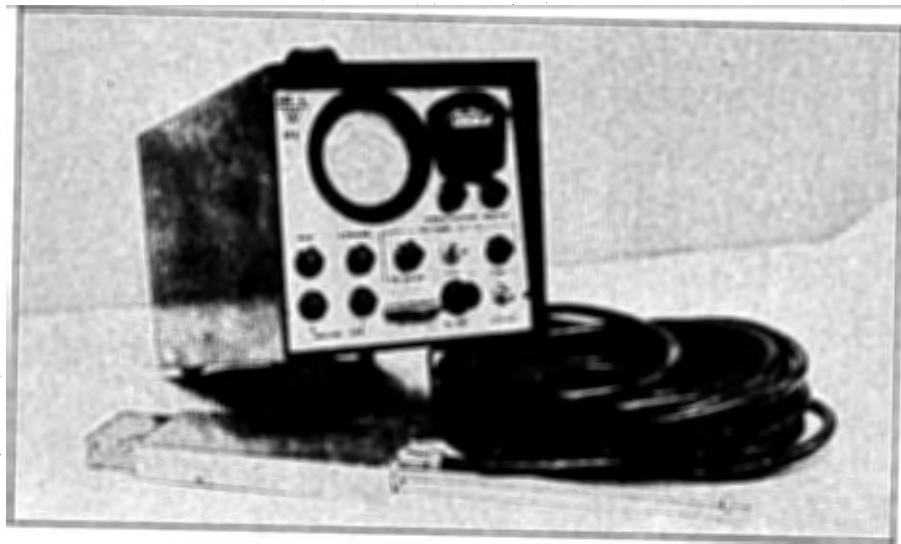


Рис.8. Частотная характеристика усилителя резонансного сигнала.

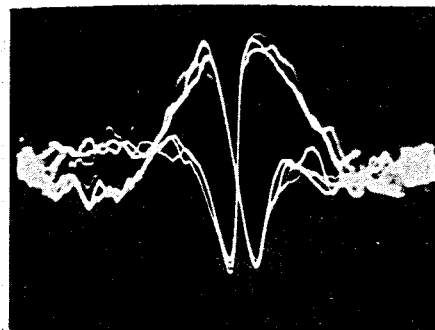


а

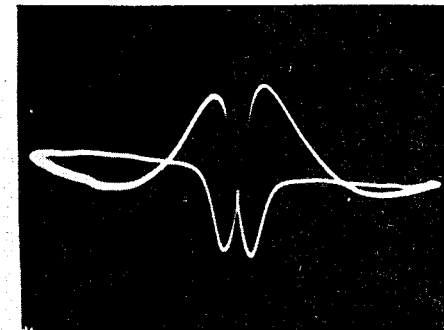


б

Рис.10. Фотографии приборов ЯМ-1 и ЯМ-2.



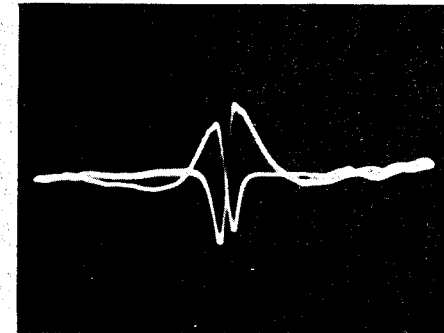
а



б



в



г

Рис.11. Фотографии импульсов ЯМР, полученные с помощью прибора ЯМ-1 в поле: а) 0,042 тл, б) 1,0 тл; и с помощью прибора ЯМ-2 в поле: в) 0,08 тл, г) 1,0 тл.