

3013

Экз. чит. 8

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

13-3013-1



ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

Ю.Н. Денисов, В.В. Калиниченко

ТРАНЗИСТОРНЫЙ ЭПР - МАГНИТОМЕТР

1966

13-3013-1

Ю.Н. Денисов, В.В. Калининко

ТРАНЗИСТОРНЫЙ ЭПР - МАГНИТОМЕТР

Для измерения магнитных полей в диапазоне индукций $10^{-6} - 10^{-2}$ тл обычно используются магнитометры с феррозондовыми (пермаллоевыми) датчиками поля. Эти приборы обладают достаточной чувствительностью и высокой относительной точностью измерений, но должны калиброваться по абсолютному измерителю магнитного поля. Наиболее удобными приборами, измеряющими абсолютную величину индукции магнитных полей в диапазоне $1 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 10^{-2}$ тл с относительно высокой точностью, являются магнитометры, основанные на явлении электронного парамагнитного резонанса ^{/1-3/}. Частота резонансного поглощения электромагнитной энергии парамагнитным образцом в рассматриваемом диапазоне полей практически линейно зависит от величины индукции внешнего магнитного поля и, следовательно, измерение магнитной индукции этими приборами сводится к измерению частоты, соответствующей середине линии поглощения при ЭПР. Величина магнитной индукции связана с резонансной частотой следующим соотношением

$$B_0 = 0,3565 \cdot 10^{-4} f_0 ,$$

где B_0 - магнитная индукция внешнего поля в тл, f_0 - резонансная частота в Мгд.

Таким образом, диапазону полей $1 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 10^{-2}$ тл соответствуют резонансные частоты 30-600 Мгд. При автодинном методе детектирования ЭПР трудно достичь перекрытия одним типом автогенератора всего этого диапазона частот, поскольку захватываются два различных диапазона длин волн - метровый и дециметровый. Поэтому приходится использовать два или несколько генераторов ^{/4/}, что существенно усложняет как собственно магнитометр, так и систему прецизионного измерения частоты. Значительно целесообразнее, если это допустимо условиями эксплуатации, создавать отдельные магнитометры для более узкого диапазона полей $1 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^{-3}$ тл и $5 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 10^{-2}$ тл. В этом случае каждый из приборов получается не сложным и однородным по составу компоновки высокочастотных элементов. В данной работе описан ЭПР-магнитометр с диапазоном измеряемых магнитных полей $4 \cdot 10^{-4} - 35 \cdot 10^{-4}$ тл. Верхний предел этого диапазона определяется, с одной стороны, соображениями, при-

веденными ранее относительно схемы автодиона, а, с другой стороны, удобством измерения резонансной частоты. В настоящее время имеются автоматические электронно-счетные частотомеры с диапазоном измеряемых частот до 100 Мгц ^{/5,6/}, что соответствует магнитной индукции $\sim 35 \cdot 10^{-4}$ тл. Минимальное значение измеряемой индукции, равное $(4-5) \cdot 10^{-4}$ тл, является той границей, ниже которой, при использовании в датчике образца из дифенилпикрилгидрозила (ДФПГ), точность измерений быстро падает. Это обусловлено двумя причинами: изменением g -фактора ДФПГ в слабых полях и увеличением случайной ошибки определения середины резонансной линии ЭПР, равной

$$\delta_M = \Delta B / k_0 B_0,$$

где ΔB - ширина резонансной линии, k_0 - отношение сигнал-шум на выходе фазочувствительного усилителя.

Блок-схема магнитометра приведена на рис. 1.

Прибор состоит из двух блоков: датчика и блока индикации резонанса.

В датчике, принципиальная схема которого показана на рис. 2, размещены автодионный детектор ЭПР, предварительный усилитель резонансного сигнала и эмиттерный повторитель, согласующий входное сопротивление кабеля, идущего к частотомеру, с выходным сопротивлением автодиона.

Автодионный детектор ЭПР выполнен на высокочастотном триоде типа ГТ311 по схеме с контуром в цепи коллектора и емкостной обратной связью с коллектора на эмиттер. Весь диапазон частот, перекрываемых автодионом, 10-100 Мгц, разбит на семь поддиапазонов, переключение которых производится путем замены легкоъемных головок датчика. В каждой головке имеется контурная катушка L_k , намотанная непосредственно на образце из дифенилпикрилгидрозила, и сопротивление R_0 , с помощью которого устанавливается оптимальный уровень генерации автодиона в каждом поддиапазоне частот. Параметры катушек L_k и величины сопротивлений R_0 для каждого поддиапазона приведены в таблице 1.

Катушка VII-го диапазона цилиндрическая, бескаркасная с внутренним диаметром 4,5 мм. Образец приклеивается внутри катушки полистироловым клеем. Остальные катушки намотаны на прямоугольных полистироловых каркасах сечением 3×4 мм². Каркасы служат также оправками для образцов из дифенилпикрилгидрозила, сцементированного полистироловым клеем. Сменная головка датчика в собранном виде показана на рис. 3. Рядом с головкой помещена катушка одного из поддиапазонов. Изменение частоты генерации внутри каждого поддиапазона производится варикапами типа Д801Б. Достигаемый коэффициент перекрытия по частоте составляет 1,4.

Сигнал низкой частоты снимается с эмиттерного сопротивления генераторного триода T_1 . RC-фильтр низких частот (20 к, 150 пф) предотвращает проникновение высокой частоты в тракт усиления резонансного сигнала. Первый каскад низкочастотного усилителя, размещенный в датчике, выполнен по схеме эмиттерного

повторителя. Это позволяет иметь малое входное сопротивление расположенного в блоке индикации усилителя резонансного сигнала и понизить тем самым уровень наводок на кабель, соединяющий датчик с этим блоком. Длина соединительного кабеля равна 5 м и при необходимости может быть значительно увеличена.

Высокочастотный сигнал также берется с эмиттера генераторного триода. Это позволяет, учитывая относительно большое (2-3 к) входное сопротивление буферного каскада на транзисторе T_2 , свести к минимуму шунтирующее действие тракта измерения частоты на режим работы автодина. Выходное напряжение на нагрузке эмиттерного повторителя во всем рабочем диапазоне частот не менее 150 мВ, что вполне достаточно для нормальной работы используемого с прибором автоматического электронно-счетного частотомера /8/.

В блоке индикации магнитометра размещены: узкополосный усилитель резонансного сигнала, низкочастотный генератор опорного напряжения, фазовый детектор со стрелочным индикатором и источник питания прибора.

Существенное влияние на величину отношения сигнал/шум на выходе усилителя резонансного сигнала оказывает выбор частоты модулирующего магнитного поля. Повышение частоты модуляции позволяет уменьшить низкочастотные шумы автодина детектора ЭПР и тем самым улучшить отношение сигнал/шум, но одновременно это приводит к увеличению синхронных паразитных наводок, затрудняющих работу фазового

Т а б л и ц а 1

Номер поддиапазона	Диапазон магнитных полей $\times 10^{-4}$ Гл	Диапазон частот Мгц		Параметры катушек	
				Число витков	Провод
I	3,9 - 5,5	11 - 15,5	6,2	80	ПЭВ-I 0,1
II	5,4 - 7,6	15 - 21,2	10,0	40	ПЭВ-I 0,18
III	7,5 - 9,8	21 - 27,8	10,0	20	ПЭВ-I 0,18
IV	9,6 - 13,2	27 - 37,3	5,6	15	ПЭВ-I 0,18
V	13 - 17,8	36,6 - 50	5,1	10,5	ПЭВ-I 0,23
VI	17,7 - 25,1	50 - 71	2,0	5,5	ПЭВ-I 0,23
VII	24,9 - 35,7	70 - 100	0,68	7	Медный по- сереб. провод $\varnothing 0,8$ мм, шаг 1 мм

детектора. Поэтому при выборе в каждом конкретном приборе оптимальной частоты модуляции приходится принимать компромиссное решение. В рассматриваемом магнитометре частота модуляции выбрана равной 500 гц.

Принципиальная схема узкополосного усилителя резонансного сигнала, настроенного на 500 гц, и фазового детектора показана на рис. 4. Избирательный усилитель состоит из одной ячейки активного RC - транзисторного фильтра, схема которого подробно анализируется в работе ^{/7/}, и двух усилительных ступеней с реостатно-емкостными связями. Общий коэффициент усиления тракта на частоте 500 гц равен 3000, эквивалентная добротность - около 10. Фазовый детектор выполнен на двух кремниевых транзисторах разного типа проводимости ^{/8/}. Напряжение на выходе схемы контролируется по стрелочному индикатору типа М-24 (100-0-100 мка).

Схема низкочастотного (на 500 гц) генератора опорного напряжения приведена на рис. 5. Задающий каскад представляет собой RC - генератор на одном транзисторе ^{/8/}. Сигнал с него подается на усилительные тракты через развязывающий эмиттерный повторитель, практически полностью исключая влияние последующих каскадов на работу задающего генератора. Питание фазового детектора опорным напряжением осуществляется от выходного каскада, собранного на высоковольтном транзисторе П21. Амплитуда опорного напряжения ≈ 19 в. Необходимый сдвиг фазы опорного напряжения по отношению к фазе резонансного сигнала устанавливается фазовращателем.

Модуляционные катушки в датчике питаются от трансформаторного усилителя мощности, собранного по схеме с дополнительной симметрией ^{/10/}. Эта схема отличается простотой, экономичностью и высокой стабильностью характеристик. Выходной трансформатор усилителя выполнен на пермалловом сердечнике Ш 12x12. Первичная обмотка содержит 2000 витков провода ПЭВ-1 0,1, а вторичная - 150 витков ПЭВ-1 0,2. Амплитуда модулирующего поля регулируется потенциометром на выходе усилителя в диапазоне $0-2 \cdot 10^{-4}$ тл.

Принципиальная схема источников питания магнитометра показана на рис. 6. Питание основных узлов прибора от индивидуальных стабилизированных источников в значительной степени ослабляет паразитные связи и обеспечивает стабильную работу прибора. Намоточные данные силового трансформатора приведены в таблице 2.

Т а б л и ц а 2

Номер обмотки	Число витков	Марка и диаметр провода
I	3000	ПЭВ-1 0,15
II	163	ПЭВ-1 0,2
III	272	ПЭВ-1 0,2
IV	544	ПЭВ-1 0,1
V	85	ПЭВ-1 0,3

Магнитопровод трансформатора ленточный, витой, сечением $25 \times 12 \text{ мм}^2$.

В приборе предусмотрено два режима измерения магнитного поля: ручной и полуавтоматический.

Выбор режима работы производится при помощи переключателя П (см. рис. 1). При ручном управлении оператор сам регулирует напряжение на варикапах, включенных в качестве контурных емкостей автодинного детектора ЭПР. Момент резонанса регистрируется по показанию стрелочного прибора на выходе фазового детектора. В режиме полуавтоматического управления сигнал с выхода фазового детектора включается последовательно с устанавливаемым вручную напряжением на варикапах. Таким образом обеспечивается автоподстройка частоты автодина к резонансному значению. При изменении (в некотором диапазоне) величины измеряемого магнитного поля, частота автодина автоматически настраивается на новое резонансное значение.

Точность измерения разработанным прибором абсолютных величин магнитных полей в диапазоне индукций $(4-35) \cdot 10^{-4}$ тл составляет $0,1\% \pm 1 \cdot 10^{-8}$ тл. Эта оценка точности получена путем сравнения результатов измерения одного и того же магнитного поля ЭПР-магнитометром и ядерным магнитометром с проточной жидкостью /11/.

В заключение авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность дипломнице Казанского университета Е.И. Мараткановой за помощь в разработке прибора; В.И. Прилипко за ряд полезных советов; П.Т. Шишляникову и Л.В. Васильеву за помощь при определении погрешности прибора; И.А. Каплину за изготовление основных узлов.

Л и т е р а т у р а

1. Д. Инграм. Спектроскопия на высоких и сверхвысоких частотах. ИЛ, 1959г.
2. А.В. Кубарев, Ю.А. Мезенев. ПНТПО, № П-81-5/1 (1981).
3. В.М. Рыжков, А.К. Чирков. Труды Уральского политехнического института, сб. 111, 89 (1981).
4. И.М. Бескровный, Ю.В. Горелкинский, С.П. Пивоваров, Р.М. Чувашов. ПТЭ, №6, 171 (1985).
5. П.П. Гавриш, Ю.Н. Денисов, А.Г. Комиссаров, В.М. Лачинов, В.И. Прилипко, Ю.И. Сусов, П.Т. Шишляников. ПТЭ, № 2, 94 (1985).
6. В.М. Лачинов. Препринт ОИЯИ, 2217, Дубна 1985.
7. W. D. Ryan. Electron. Eng. 31, 103, (1959).
8. J. L. Helfrich, I. F. Blizzard, Rev. Scient. Instr. 34, 1229 (1963).
9. E. T. Emma. Electron. Eng. 32, 506 (1960).
10. С. Шварц. Полупроводниковые схемы. ИЛ, 1982.
11. А.И. Жерновой, Г.Д. Латышев. Ядерный магнитный резонанс в проточной жидкости. Атомиздат, 1984 г.

Рукопись поступила в издательский отдел
4 ноября 1986 г.

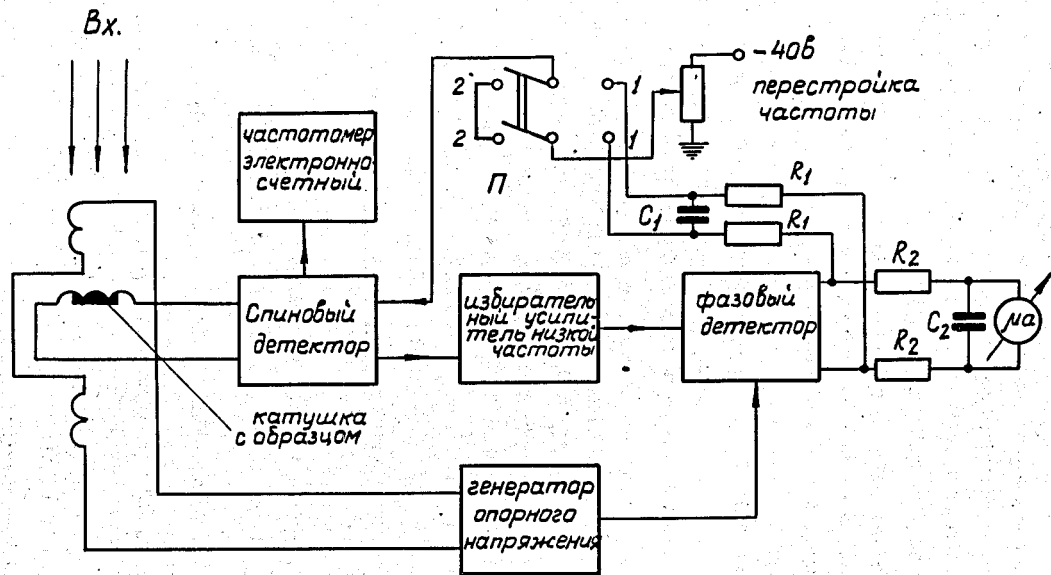


Рис. 1. Блок-схема магнитометра.

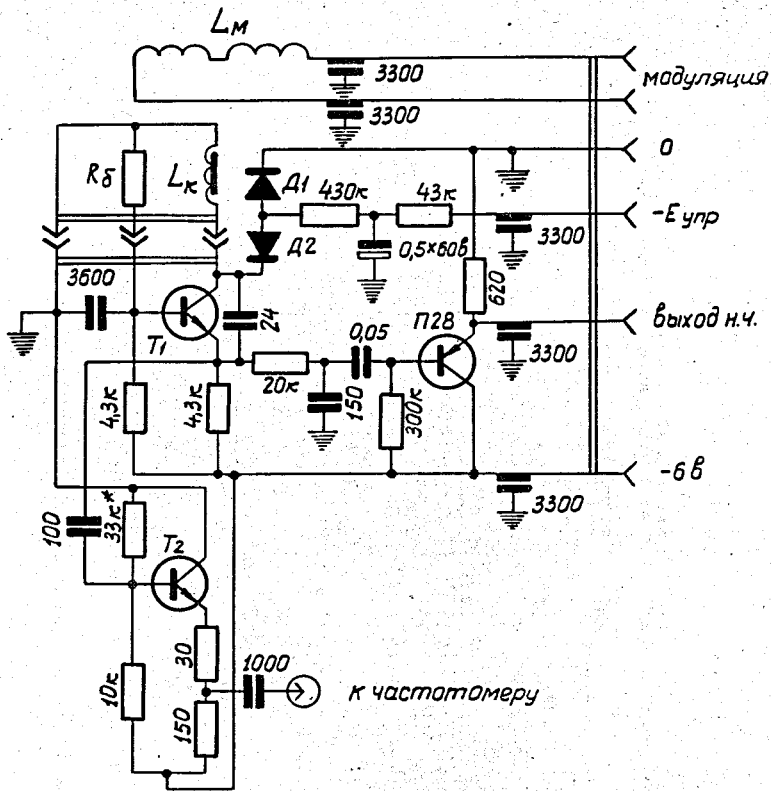


Рис. 2. Принципиальная схема датчика.

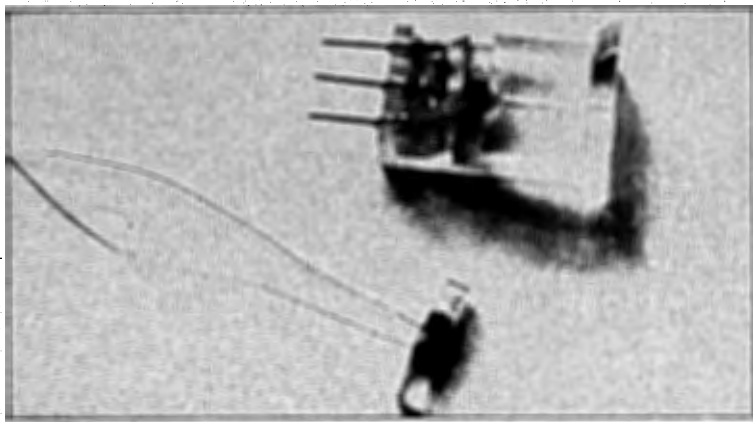


Рис. 3. Сменная головка датчика.

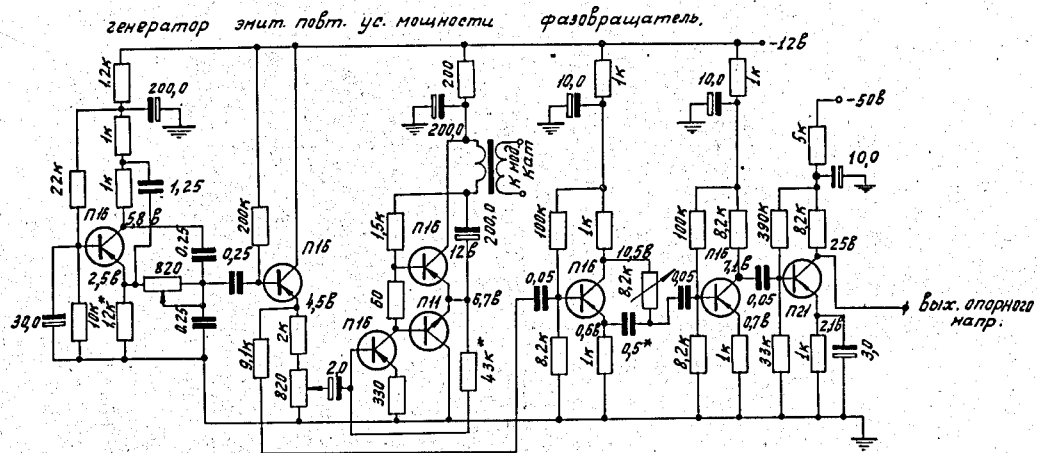


Рис. 5. Принципиальная схема генератора опорного напряжения частоты 500 гц.

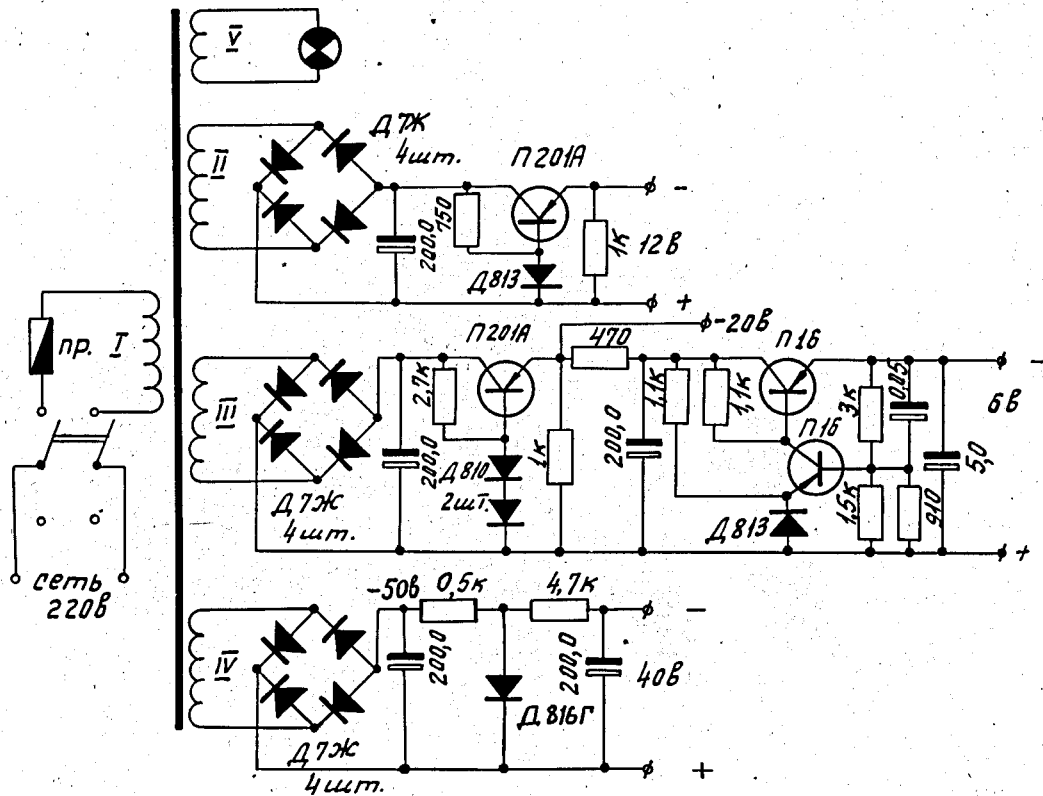


Рис. 6. Принципиальная схема источников питания магнитометра.