

С 345 е4

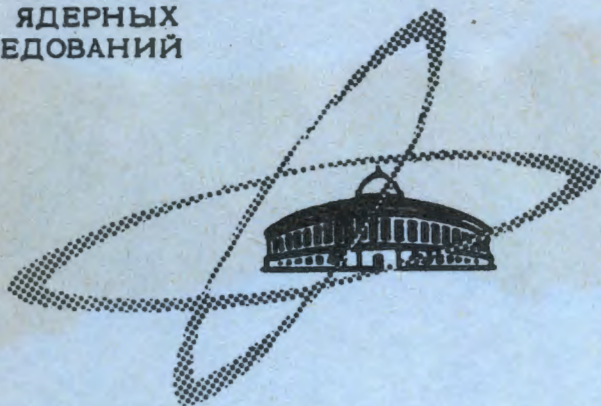
К-172

23/III-67.

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

13-3156-1



ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

В.В. Калиниченко

МАГНИТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ НУЛЬ-ЭЛЕМЕНТ

1967.

13-3156-1

4856/1 пр.

В.В. Калининченко

МАГНИТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ НУЛЬ-ЭЛЕМЕНТ

Общество с ограниченной ответственностью
"НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ЦЕНТР БИОТЕКА"

ЭПР - магнитометры широко применяются в качестве абсолютных измерителей слабых постоянных магнитных полей. Чувствительным элементом таких приборов, регистрирующим абсолютное значение магнитной индукции, является датчик сигналов электронного парамагнитного резонанса. Несколько видоизменив методику использования ЭПР, можно на основе этого явления построить чувствительный элемент, регистрирующий нулевое значение магнитной индукции, т.е. магниточувствительный нуль-элемент. Такой элемент может быть использован в компенсационных магнитометрах, а также в некоторых типах стабилизаторов напряжения или тока^{1/}.

Если частота электромагнитного поля, создаваемого в объеме образца, имеет значение того же порядка, что и ширина резонансной линии (выраженная через значение частоты), то действительная часть динамической магнитной восприимчивости образца может быть представлена в виде (если $\mu_n H_1 \ll V_0$):

$$\chi' = \frac{1}{2} \chi_0 \omega_0 T_2 \left[\frac{T_2 \gamma (V_0 - V)}{D + T_2^2 \gamma^2 (V_0 - V)^2} + \frac{T_2 \gamma (V_0 + V)}{D + T_2^2 \gamma^2 (V_0 + V)^2} \right]. \quad (1)$$

Здесь $D = 1 + \gamma^2 \mu_n^2 H_1^2 T_1 T_2$, γ - гиромагнитное отношение, тл⁻¹·сек⁻¹; μ_n - магнитная проницаемость вещества, из которого изготовлен образец; H_1 - напряженность высокочастотного магнитного поля; T_1 - время спин-решеточной релаксации; T_2 - время спин-спиновой релаксации; V_0 - резонансное значение индукции; ω_0 - резонансное значение частоты; χ_0 - статическая магнитная восприимчивость образца.

Дисперсионная составляющая сигнала ЭПР обусловлена χ'' , поэтому закон изменения напряжения ($U_{\text{ВЫХ}}$) на выходе приемника сигнала дисперсии

при изменении индукции в точности соответствует функции $\chi'(B)$. На рис. 1 в произвольном масштабе представлена эта зависимость, построенная в соответствии с выражением (1). Характер зависимости $U_{\text{вых}} = f(B)$ таков, что при наложении гармонического модулирующего поля достаточной амплитуды ($B > B_0$) может быть выделено управляющее напряжение, величина которого пропорциональна индукции внешнего поля, а знак определяется его направлением. Если внешнее поле $B=0$, то и управляющее напряжение равно нулю. На рис.2 изображена блок-схема нуль-элемента (а) и эпюры напряжения (б) на выходе приемника сигнала дисперсии в случае гармонической модуляции при различных значениях индукции внешнего поля B .

Для выделения дисперсионной составляющей сигнала ЭПР целесообразно использовать автодинный метод ^{1/3/}. В этом случае катушка с образцом (датчик сигналов ЭПР) является индуктивностью контура автогенератора. Возникающее в области резонанса изменение магнитной восприимчивости вызывает амплитудную и частотную модуляцию генерируемых колебаний, последняя регистрируется с помощью приемника частотно-модулированных сигналов. Автодин и приемник ЧМ - сигналов образуют в совокупности приемник сигнала дисперсии.

Дискриминатор представляет собой устройство, преобразующее последовательность импульсов $U_{\text{вых}}$ (рис. 2б) в управляющее напряжение. При построении схемы дискриминатора могут быть использованы различные принципы.

Важнейшей характеристикой нуль-элемента является чувствительность (быстрый дрейф нуля), определяемая как минимальное изменение индукции $\Delta B_{\text{др}}$ в окрестности значения $B=0$, которое вызывает изменение напряжения на выходе дискриминатора $\Delta U_{\text{др}}$, равное уровню шумов.

Чувствительность можно оценить, воспользовавшись следующим приближенным соотношением:

$$\Delta B_{\text{др}} \approx \Delta B_{\text{л}} / k_0 Q, \quad (2)$$

где $\Delta B_{\text{л}}$ - ширина резонансной линии; k_0 - отношение амплитуды импульсов к уровню флюктуаций на выходе приемника сигнала дисперсии при $B=0$; Q - улучшение отношения сигнал/помеха, обеспечиваемое дискриминатором, $Q = U_{\text{ш вх}} / U_{\text{ш вых}}$.

Флюктуации напряжения на выходе приемника сигнала дисперсии обусловлены двумя основными причинами: быстрыми изменениями частоты автодина, а также шумами автодина и приемника.

Искажения формы модулирующего тока приводят к смещению "нуля". Величина этого смещения при малых искажениях тока в худшем случае достигает значения

$$\Delta V_{\phi} \approx 2 \Delta V_{л k_f}, \quad (3)$$

где k_f - коэффициент нелинейных искажений модулирующего тока.

Таким образом, максимальная ошибка регистрации "нулевого значения индукции", с учетом (2) и (3), равна:

$$\delta V_{\max} = \Delta V_{л} \left(\frac{1}{k_0 Q} + 2k_f \right). \quad (4)$$

Измерение чувствительности производилось на установке, выполненной по блок-схеме рис. 2а и дополненной нуль-индикатором, включенным на выходе дискриминатора (стрелочный прибор М-24 50-0-50 мка).

На рис. 3 приведена схема автодина. Это автогенератор на транзисторе ГТ311 (T_1) с контуром в цепи коллектора и емкостной обратной связью с коллектора на эмиттер. Частота генерации выбрана равной 14,025 Мгц (что соответствует $V_0 = 5 \cdot 10^{-4}$ тл) и стабилизируется системой АПЧ по кварцовой частоте гетеродина ЧМ-приемника. Управляющее напряжение подводится к варикапу с помощью RC-цепи (49 ком; 0,05 мкф), предотвращающей демодуляцию. Характеристика частотного детектора используемого ЧМ-приемника линейна в пределах 6 кгц и имеет крутизну 1 в/кгц. Конструкция катушки с образцом приведена в работе /2/. В качестве рабочего вещества используется дифенилкрилгидразил. Размеры образца: $3 \times 4 \times 3,5$ мм³.

Буферный усилитель (T_2 -П403) ослабляет влияние внешних цепей на частоту колебаний автогенератора. Напряжение высокой частоты подводится ко входу ЧМ-приемника с помощью радиочастотного кабеля необходимой длины. Следует отметить, что все элементы схемы рис. 3 смонтированы в отдельном выносном датчике.

Блок-схема применяемого дискриминатора представлена на рис. 4. Если $V = 0$, в спектре последовательности импульсов на выходе приемника сигнала дисперсия отсутствует первая гармоника частоты модуляции. При $V \neq 0$ в спектре выходного напряжения появляется первая гармоника, ее амплитуда пропорциональна V , а фаза изменяется на 180° при переходе V через нуль. Таким образом, управляющее напряжение может быть получено посредством фазочувстви-

тельного детектирования гармонического напряжения частоты F_M , выделенного избирательным усилителем из последовательности импульсов $U_{\text{вых}}$.

Амплитуда модулирующего поля, создаваемого модуляционными катушками в объеме образца, равна $5,3 \cdot 10^{-4}$ тл, частота модуляции $F_M \approx 300$ гц. Питание модулирующих катушек в экспериментальной установке осуществляется от генератора звуковой частоты $3Г - 10$ ($k_f < 0,7\%$).

При измерении флюктуаций "нуля" магнитное поле Земли в объеме образца компенсируется полем постоянного магнита. Затем путем многократного измерения малого эталонного возмущения $\Delta B_{\text{эт}}$ определяется цена деления шкалы нуль-индикатора, показания которого после такой операции и характеризуют дрейф нуля, если поле в объеме образца неизменно. Проверка цены деления шкалы в процессе измерений производится периодически.

Проведенные на макете измерения показали, что дрейф нуля не превышает $\pm 0,005 \cdot 10^{-4}$ тл. Постоянная времени фильтра на выходе фазового детектора $\tau_{\phi} \approx 0,5$ сек. Есть основания полагать, что совершенствование экспериментальной установки позволит уменьшить величину дрейфа в несколько раз.

Важно отметить, что описываемый магниточувствительный нуль-элемент реагирует только на компоненту поля B , являющуюся проекцией B на направление вектора модулирующего поля B_M . При этом величина поперечной (относительно H_1) компоненты B , лежащей в плоскости, перпендикулярной B_M , не должна превышать значение B_0 .

Автор выражает благодарность студенту Казанского университета С.П. Владышкинову за помощь при монтаже и наладке макета; В.И. Прилипо за ряд полезных советов. Автор благодарит Ю.Н. Денисова, прочитавшего рукопись и сделавшего ряд замечаний, способствовавших ее улучшению.

Л и т е р а т у р а

1. И.Г. Гольд्रेер. Стабилизаторы напряжения, Госэнергоиздат, М.-Л., 1957.
2. Ю.Н. Денисов, В.В. Калинин. Транзисторный ЭПР - магнитометр. Препринт ОИЯИ, 13-3013-1, Дубна, 1966.
3. А. Лёше. Ядерная индукция, ИЛ, 1963.

Рукопись поступила в издательский отдел
3 февраля 1967 г.

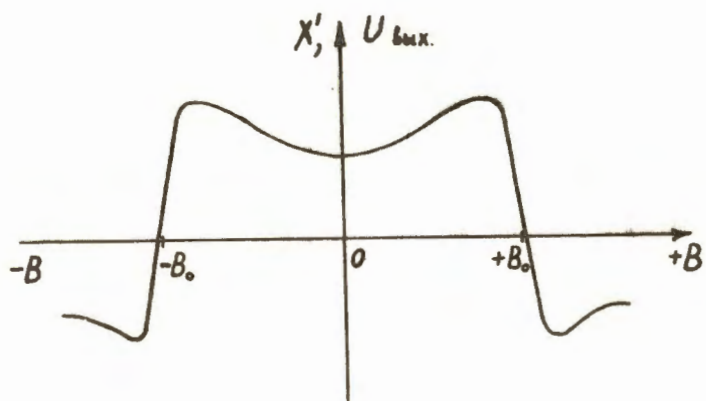


Рис. 1. Зависимость χ' (или напряжения на выходе приемника сигнала дисперсии) от индукции внешнего магнитного поля.

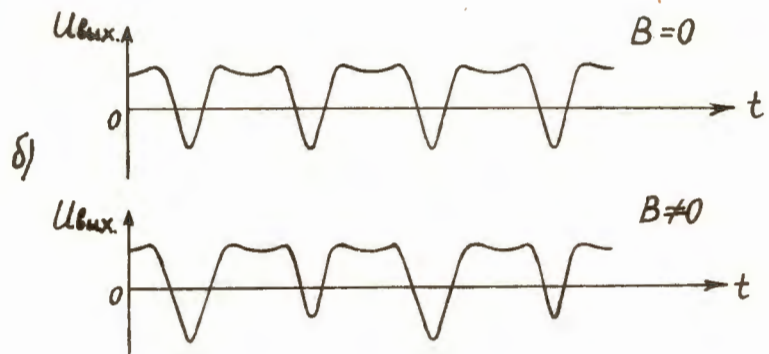
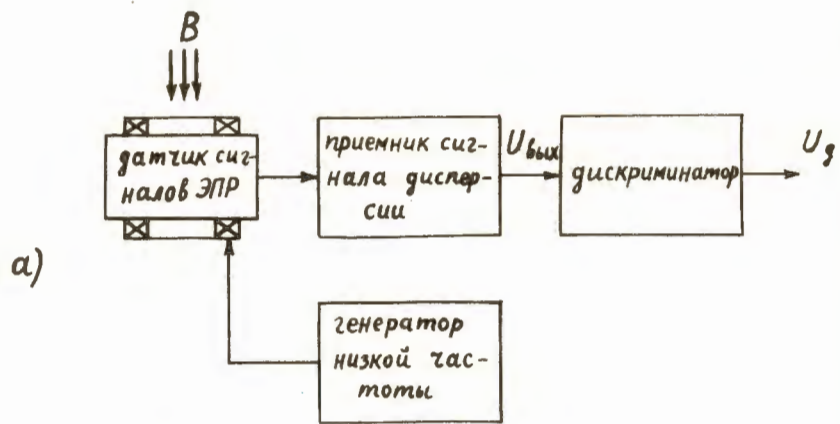


Рис. 2. Блок-схема нуля-элемента (а) и эпюры напряжения на выходе приемника сигнала дисперсии в случае гармонической модуляции поля при разных значениях индукции внешнего поля (б).

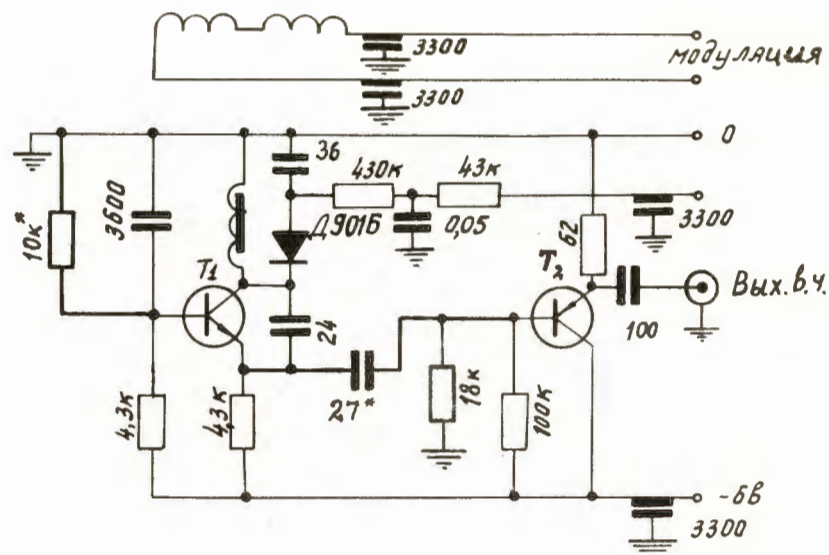


Рис. 3. Принципиальная схема автодина.

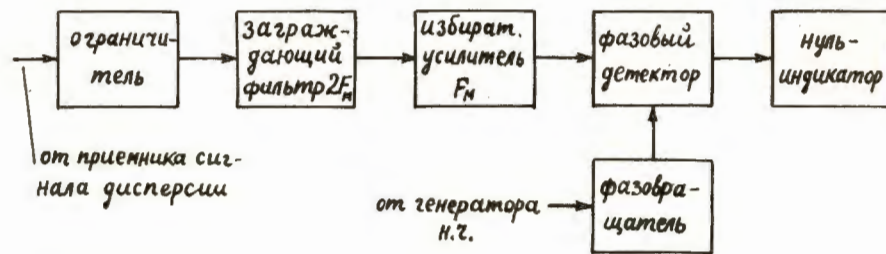


Рис. 4. Блок-схема дискриминатора.