

К-172

7/11/68

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

13- 3626



УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ  
МАТЕРИАЛЫ  
ЛЭБОРТОРИИ  
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

В.В.Калиниченко

ПРИЕМНИК ДИСПЕРСИОННОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ  
СИГНАЛА ЭПР

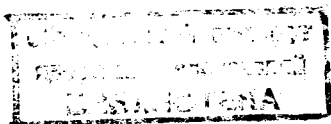
1967.

13- 3626

В.В.Калиниченко

ПРИЕМНИК ДИСПЕРСИОННОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ  
СИГНАЛА ЭПР

5578/2 из.



Обсуждаемый в работе<sup>/1/</sup> метод построения магниточувствительного нуль-элемента предполагает использование дисперсионной составляющей сигнала электронного парамагнитного резонанса (ЭПР). Схемы выделения абсорбционной составляющей сигнала ЭПР, благодаря большому интересу экспериментаторов именно к этой составляющей сигнала, получили значительное развитие и хорошо известны. Конкретные схемы регистрации сигнала дисперсии описываются лишь в немногих работах. Это позволяет надеяться, что данная статья будет полезной.

В работах<sup>/2,3/</sup> отмечается, что для регистрации сигнала дисперсии целесообразно применить автодинный метод. В этом случае катушка с образцом является элементом контура автогенератора. Относительное изменение индуктивности катушки при магнитном резонансе равно<sup>/4/</sup>

$$\Delta L / L = \eta \chi' \mu_0 / \mu_n . \quad (1)$$

где  $\eta$  - коэффициент заполнения,  $\chi'$  - действительная часть комплексной магнитной восприимчивости,  $\mu_0$  - магнитная проницаемость свободного пространства,  $\mu_n$  - абсолютная магнитная проницаемость материала образца.

Так как величина  $\Delta L / L$  весьма мала (ввиду малости  $\chi'$ ), относительное изменение частоты генерируемых колебаний может быть определено из соотношения

$$\Delta \omega / \omega_0 = - \Delta L / 2L$$

или, с учетом (1),

$$\Delta \omega / \omega_0 = - \eta \chi' \mu_0 / 2 \mu_n . \quad (2)$$

Частотные изменения регистрируются с помощью супергетеродинного приемника частотно-модулированных сигналов, напряжение на выходе которого про-

порционально  $\chi'$  (сочетание автодина и приемника ЧМ-сигналов будем называть приемником сигналов дисперсии). Действительная часть комплексной магнитной восприимчивости равна<sup>/3/</sup>

$$\chi' = \frac{1}{2} \chi_0 \omega_0 T_2 \frac{T_2 \gamma (V_0 - V)}{D + T_2^2 \gamma^2 (V_0 - V)},$$

где  $D = 1 + \gamma^2 \mu_a^2 H_1^2 T_1 T_2$ ;  $\gamma$  - гиромангнитное отношение,  $\text{гл}^{-1} \cdot \text{сек}^{-1}$ ;  $H_1$  - напряженность высокочастотного магнитного поля;  $T_1$  - время спин-решеточной релаксации;  $T_2$  - время спин-спиновой релаксации;  $V_0$  - резонансное значение индукции;  $\omega_0$  - резонансное значение частоты;  $\chi_0$  - статическая магнитная восприимчивость образца.

Максимальное значение  $\chi'$  получается при

$$(V_0 - V) = \frac{1}{T_2} (1 + \gamma^2 \mu_a^2 H_1^2 T_1 T_2)^{\frac{1}{2}}$$

и составляет

$$\chi'_{\max} = \omega_0 \chi_0 T_2 / 4 (1 + \gamma^2 \mu_a^2 H_1^2 T_1 T_2)^{\frac{1}{2}}.$$

Если  $\gamma H_1 \ll 1$ , то

$$\chi'_{\max} \approx \omega_0 \chi_0 T_2 / 4.$$

Важнейшей характеристикой является отношение сигнал/шум на выходе приемника сигнала дисперсии. Шумы на выходе частотного детектора обусловлены двумя составляющими: шумами приемника и флюктуациями частоты автодина. Первая составляющая может быть сведена к минимуму, если мощность колебаний, подводимая к входу приемника, много больше входной мощности шумов приемника ( $P_{\text{вх}} \gg P_{\text{ш.вх}} = k T G \Delta f$ , здесь  $G$  - коэффициент шума приемника).

Рассмотрим вторую составляющую. Флюктуации частоты автогенератора вызываются рядом внешних факторов (пульсации напряжения источников питания, электрические и магнитные наводки, механические вибрации колебательной системы и др.) и собственными шумами автогенератора. Влияние внешних факторов может быть устранено или значительно ослаблено. Поэтому при оценке отношения сигнал/шум учтем только влияние собственных шумов автогенератора.

Как показывает приближенный анализ/5/, среднеквадратичное значение частотной флюктуации автогенератора, обусловленное шумами, равно:

$$\Delta \omega_{\text{ш}} = \sigma_1 \omega_0 / 2Q I_R, \quad (3)$$

где  $\sigma_1$  - эффективное (среднеквадратичное) значение флюктуационной составляющей тока активного двухполюсника,  $I_R$  - амплитуда автогенератора,  $Q$  - добротность контура.

Максимальное отклонение частоты автогенератора, соответствующее максимуму  $\chi'$ , согласно (2), равно:

$$|\Delta \omega_{\text{max}} / \omega_0| = \eta \chi'_{\text{max}} \mu_0 / 2\mu_{\text{н}}. \quad (4)$$

Отношение сигнал/шум на выходе частотного детектора равно в соответствии с (3) и (4):

$$\frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{ш}}} = \frac{\Delta \omega_{\text{max}}}{\Delta \omega_{\text{ш}}} = \frac{\mu_0 \eta \chi'_{\text{max}} Q I_R}{\mu_{\text{н}} \sigma_1}. \quad (5)$$

Напряжение на выходе приемника сигнала дисперсии содержит также составляющую, обусловленную  $\chi''$ . Это приводит к нарушению соответствия между  $U_{\text{вых}}$  и  $\chi'$ , т.е. к искажениям. Оценим величину этих искажений. Изменение  $\chi''$  приводит к изменению добротности колебательной системы, причем это изменение равно/8/:

$$\Delta Q = -\eta \chi'' Q^2 \mu_0 / \mu_{\text{н}}. \quad (6)$$

Изменение добротности колебательной системы обуславливает изменение частоты автогенератора, которое равно/7/:

$$\frac{\Delta \omega}{\omega_0} = -\frac{\Delta Q}{2Q^2} \operatorname{tg} \phi$$

или с учетом (6)

$$\frac{\Delta \omega}{\omega_0} = \frac{\eta \chi'' \mu_0}{\mu_{\text{н}}} \operatorname{tg} \phi. \quad (7)$$

где  $\phi = \phi_{21} + \phi_{k0}$ ;  $\phi_{21}$  - сдвиг по фазе между напряжением возбуждения и первой гармоникой тока, вызванный комплексностью проводимости  $Y_{21}$ ,  $\phi_{k0}$  - фазовый угол коэффициента обратной связи.

Сравнение (7) с (4) показывает, что искажения тем меньше, чем меньше значение  $\lg \phi$ ; таким образом, схема автогенератора должна обеспечить работу при малых углах  $\phi$ .

Следует отметить, что ввиду малого значения  $\Delta \omega_{\max} / \omega_0$  частотный детектор приемника должен обладать высокой крутизной. Это требование может быть несколько ослаблено, если использовать преобразование "на частоте  $n$ -ой гармоники". В случае преобразования "на частоте  $n$ -ой гармоники" значение  $\Delta \omega_{\max} / \omega_0$  увеличивается в  $n$  раз ( $n \Delta \omega_{\max} / \omega_0$ ). Однако при этом усложняются некоторые узлы ЧМ-приемника.

На рис. 1 представлена схема приемника сигнала дисперсии, которая использовалась для наблюдения дисперсионной составляющей сигнала ЭПР в дифенилкрилгидразиле на частоте 14,95 Мгц. Автодин выполнен по схеме высокостабильного генератора Клаппа<sup>/8/</sup> на высокочастотном транзисторе ГТ311 ( $T_1$ ). Развязывающий усилитель ( $T_2$ ) уменьшает влияние внешних цепей на автогенератор.

Соотношение между элементами контура автодина  $L_k$  и  $C_k$  может лежать в широких пределах. В состав емкости контура входит и емкость варикапа (Д 901Б), степень связи которого с контуром может выбираться к широким пределам в зависимости от требований к системе АПЧ. Парамагнитный образец помещается в катушку контура автодина  $L_k$ ; таким образом, ее конструкция определяется требованиями к образцу и его физическим состоянием. В рассматриваемом случае<sup>/1/</sup> образец должен иметь минимальный объем, при котором, разумеется, обеспечивается удовлетворительное отношение сигнал/шум. Удовлетворительные результаты были получены при намотке катушки  $L_k$  на стеклянной трубке с наружным диаметром 1,5 мм и внутренним около 1 мм. Длина намотки равна диаметру трубки или несколько меньше, намотка однослойная или двухслойная в зависимости от необходимой величины индуктивности, провод ПЭВ - 1  $\phi$  0,06. Трубка наполнена порошкомДФПГ.

Особенностью режима ЧМ - приемника является работа при большом уровне входного в.ч. сигнала, который поступает с автодина (0,2-0,5 в). Поэтому

практически отпадает необходимость в усилении по промежуточной частоте. ЧМ-приемник содержит смеситель, усилитель-ограничитель промежуточной частоты, частотный детектор, эмиттерный повторитель и кварцевый гетеродин. Все эти узлы выполнены на основе широко применяемых и хорошо работающих схем. Выбор значения промежуточной частоты подчинен получению большой крутизны частотного детектора. В качестве частотного детектора используется индуктивный дискриминатор с фазовым детектированием. Показано<sup>9/</sup>, что при  $L_1 = L_2$ ,  $C_1 = C_2$ ,  $Q_1 = Q_2$  и  $kQ = 1$  крутизна такого дискриминатора максимальна и ее значение может быть определено из выражения

$$S_{D \max} = \frac{0,14 I_D Q^2 k_D}{f_D^2 C_D},$$

где  $I_D$  - ток частоты  $f_D$ , подводимый к первичному контуру дискриминатора;  
 $k_D$  - коэффициент передачи детектора;  
 $f_D$  - частота дискриминатора, промежуточная частота;  
 $C_D$  - емкость контура дискриминатора.

Для получения высокого значения крутизны (около 20 в/кгц) значение промежуточной частоты выбрано низким ( $f_D = 50$  кгц).

Ниже приведены основные сведения о некоторых элементах приемника сигнала дисперсии, не отраженные на принципиальной схеме:

- а) дроссели в.ч.  $Dp_1$  и  $Dp_2$  имеют индуктивность 40 мкги;
- б) трансформатор Тр:  $w_1 = 100$  вит,  $w_2 = 12$  вит, провод ПЭЛШО  $\phi$  0,35; 2 кольца  $\Phi$  - 2000, внешний диаметр 17,5 мм;
- в) катушки индуктивности дискриминатора  $L_1$  и  $L_2$  выполнены на броневых сердечниках СБ-4а,  $L_1$  - 130 + 170 витков,  $L_2$  - 150 + 150 витков, провод ЛЭШО 7 x 0,07; при указанных параметрах контура для получения значения  $kQ = 1$  расстояние между центрами сердечников  $L_1$  и  $L_2$  должно быть равно 35 мм;
- г) контур в цепи коллектора кварцевого генератора настраивается на третью гармонику кварца (15 Мгц).

Наладка узлов устройства производилась по стандартной методике, принятой для такого рода схем.

На рис. 2 представлена осциллограмма сигнала дисперсии в  $3 \text{ мм}^3$  ДФПГ, полученная с помощью описанной схемы. Прохождение резонанса осуществлялось линейно изменяющимся во времени магнитным полем.

Автор благодарит дипломника Казанского университета С.П. Владейшикова за помощь при изготовлении и наладке схем. Автор благодарит также Ю.Н. Денисова, прочитавшего рукопись и сделавшего ряд замечаний, способствующих ее улучшению.

#### Л и т е р а т у р а

1. В.В. Калинин. Магниточувствительный нуль-элемент. Препринт ОИЯИ, 13-3156-1, Дубна 1967.
2. К. Гортер. Парамагнитная релаксация. ИЛ, 1949.
3. А. Лёше. Ядерная индукция, ИЛ, 1963.
4. Н.Н. Шумиловский, А.Л. Скрипко, В.С. Король, Г.В. Ковалев. Методы ядерного магнитного резонанса. Изд-во "Энергия" 1966.
5. И.С. Гоноровский. Радиотехнические цепи и сигналы. Изд-во "Советское радио", 1963.
6. А.Ф. Харвей. Техника сверхвысоких частот, т.1. Изд-во "Советское радио", 1965.
7. С.И. Бычков, Н.И. Буренин, Р.Т. Сафаров. Стабилизация частоты генераторов СВЧ. Изд-во "Советское радио", 1962.
8. R.L. Garvin, A.M. Patlack. *Rev. Sci. Instr.*, 36, 741 (1965).
9. М.Р. Капланов, В.А. Левин. Автоматическая подстройка частоты. Госэнергоиздат, 1962.

Рукопись поступила в издательский отдел  
14 декабря 1967 г.



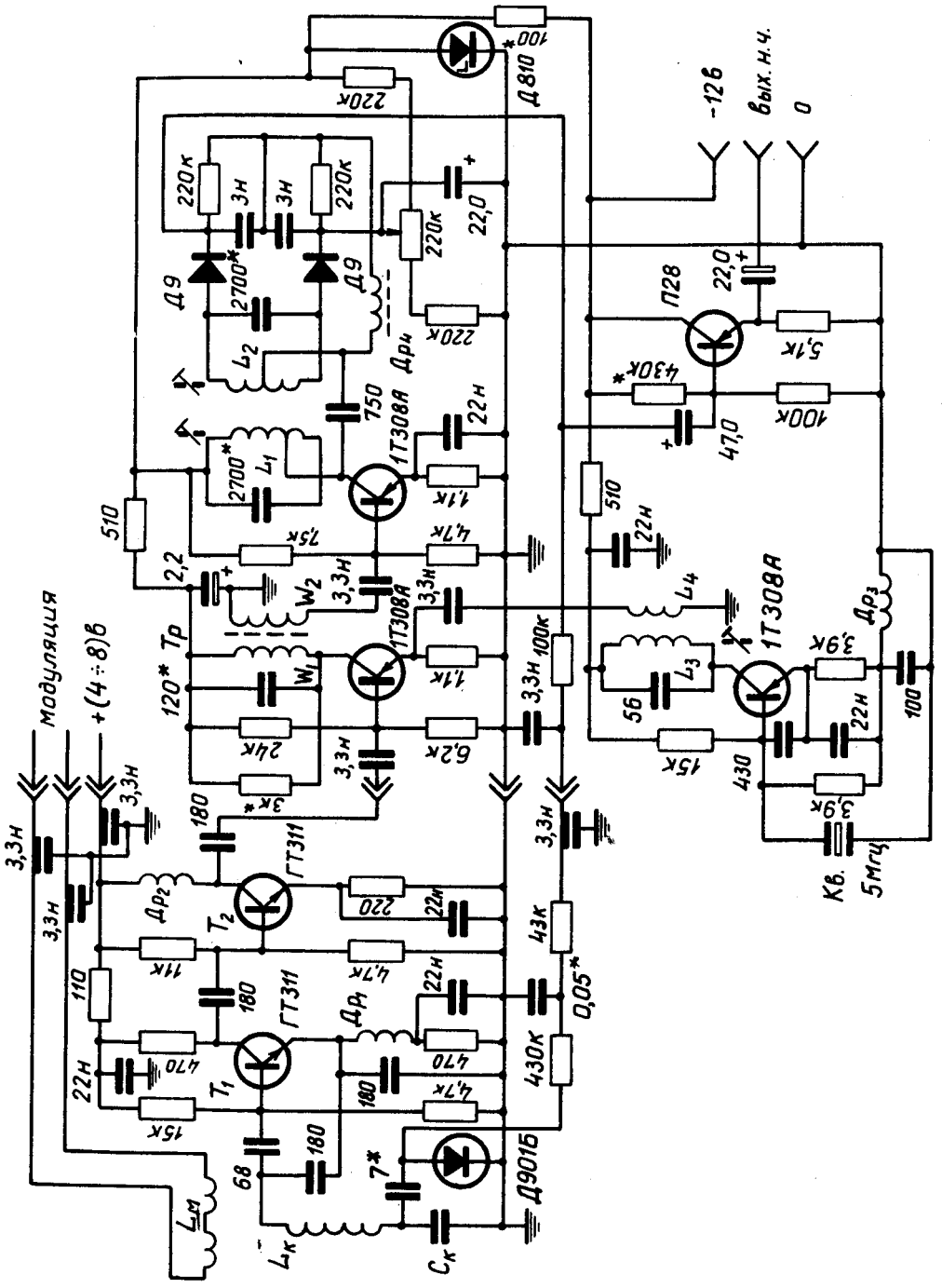


Рис. 1.

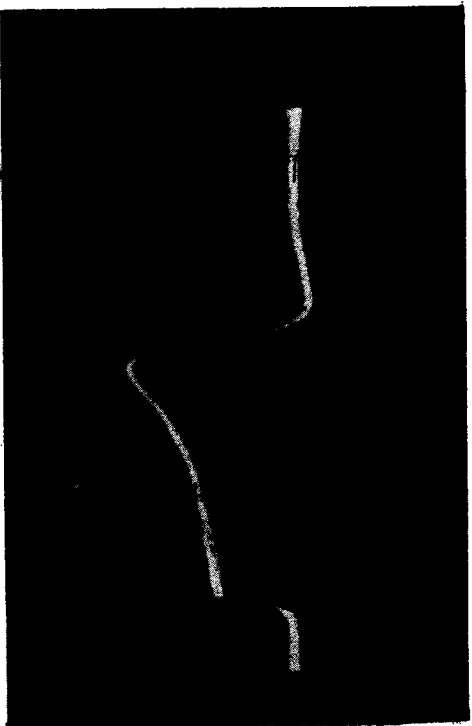


Рис. 2.