

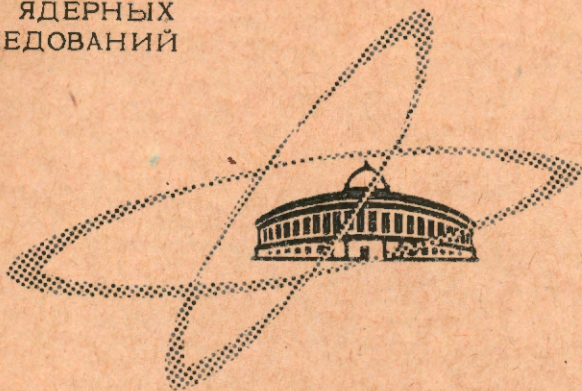
1990

Экз. чит. зала

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

P-1990



Ю.Н.Денисов, С.А.Ивашкевич, В.В.Калиниченко

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

СТАБИЛИЗАТОР МАГНИТНОГО ПОЛЯ
С ШИРОКОДИАПАЗОННЫМ ДАТЧИКОМ НА ЭПР

1965

P-1990

Ю.Н.Денисов, С.А.Ивашкевич, В.В.Калищченко

СТАБИЛИЗАТОР МАГНИТНОГО ПОЛЯ
С ШИРОКОДИАПАЗОННЫМ ДАТЧИКОМ НА ЭПР

Направлено в ПТЭ

**Научно-техническая
библиотека
ОИЯИ**

Как уже указывалось /1/, в некоторых случаях, наряду с другими известными методами стабилизации магнитных полей, могут успешно использоваться и методы, основанные на электронном парамагнитном резонансе (ЭПР). В настоящее время для прецизионной стабилизации магнитных полей в широком диапазоне значений обычно используются ядерные стабилизаторы /2,3,4,5/, в которых сигнал ЯМР регистрируется или легко перестраиваемыми автодинными детекторами, или схемой Роллина с регенеративным детектором. В обоих случаях при стабилизации полей электромагнитов с диаметром полюсных наконечников, превышающим 0,5–1 м, непосредственно в зазоре магнита, кроме резонансного контура с образцом и модуляционных катушек, размещаются и элементы автодинного или регенеративного детекторов ЯМР – электронные лампы, полупроводниковые диоды и триоды, сопротивления, конденсаторы и ряд других радиодеталей. Таким образом, в этих стабилизаторах датчик магнитного поля состоит из большого числа деталей с ограниченным сроком службы. Применение таких датчиков в системах стабилизации относительно небольших лабораторных электромагнитов затруднений не вызывает. В случае отказа датчик легко может быть извлечен и отремонтирован или заменен новым. В установках, где после монтажа доступ к ним длительное время будет практически невозможен или сопряжен с большими трудностями, применение таких датчиков крайне нежелательно. Использование электронного парамагнитного резонанса позволяет создать относительно широкодиапазонную систему стабилизации с более простыми и надежными датчиками магнитного поля.

На рис. 1 показана блок-схема стабилизатора такого типа, разработанная в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ. Непосредственно в поле стабилизируемого электромагнита размещается только поглощающая камера с образцом и катушки, создающие модулирующее магнитное поле. Генератор СВЧ и аппаратура для регистрации сигнала ЭПР могут располагаться на значительном удалении от электромагнита и связываются с поглощающей камерой при помощи волноводной линии необходимой длины.

В описываемом стабилизаторе поглощающая камера выполнена в виде отрезка прямоугольного волновода, закороченного дроссельным поршнем (см. рис. 2). Выбор такого типа поглощающей ячейки исключает необходимость точной настройки датчика на частоту заданного значения. Образец из дифенилпикрилгидразила приклеивается

полистироловым клеем на поверхности поршня. При использовании волны типа H_{10}^x) поглощающая камера должна быть расположена таким образом, чтобы магнитные силовые линии стабилизируемого поля B_0 и модулирующего поля B_m были перпендикулярны широкой стенке волновода, либо направлены вдоль его оси.

Часть электромагнитной энергии, отраженной поглощающей камерой, через направленный ответвитель (5) (см. рис. 1) поступает к детектору (6). При ЭПР некоторая доля СВЧ энергии поглощается образцом и напряжение на нагрузке детектора U_g уменьшается. При точном выполнении резонансного условия $f_0 = k B_0$, где B_0 - индукция внешнего магнитного поля, f_0 - частота СВЧ генератора и k - постоянная, определяемая характеристиками используемого в образце вещества, - U_g минимально.

При перестройке частоты СВЧ генератора (что необходимо для изменения величины стабилизируемого магнитного поля) входное сопротивление волноводного тракта, нагруженного короткозамкнутым отрезком волновода, будет изменяться в широких пределах. Рассогласование выхода генератора с нагрузкой на некоторых участках рабочего диапазона частот приведет к значительному уменьшению сигнала ЭПР из-за сильного снижения уровня мощности, поступающей в волноводный тракт. Для выравнивания величины сигнала ЭПР по диапазону генератор подключается к линии передачи через трансформатор полных сопротивлений.

Для волны типа H_{10} в прямоугольном волноводе напряженность высокочастотного магнитного поля в пучности (в режиме стоячих волн) определяется из выражения

$$H_1^2 = \frac{4P\sqrt{1-(k_p/f)^2}}{30\pi ab}$$

где $k_p = c/2a$, c - скорость света, P - мощность, подводимая к поглощающей камере, a и b - соответственно размеры широкой и узкой стенок волновода.

Мощность, поглощаемая образцом при резонансе, равна /7/

$$\Delta P = \pi f_0 \chi'' \int_{V_a} f_1 H_1^2 dV_a$$

где χ'' - мнимая компонента комплексной динамической восприимчивости, V_a - объем образца.

Если пренебречь неоднородностью высокочастотного магнитного поля в объеме образца, то

$$\Delta P = \pi f_0 \chi'' H_1^2 V_a$$

Относительное изменение мощности, поступающей к детектору при резонансе, составляет

$$\frac{\Delta P_g}{P_g} = \frac{f_0 V_a \chi''}{7,5 a b} \sqrt{1 - (f_{kp} / f_0)^2}$$

х) О типах волн см. работу /6/.

Если в датчике используется образец из дифенилкрилгидразила объемом $0,075 \text{ см}^3$ с шириной резонансной линии $\Delta B_d = 6 \cdot 10^{-4} \text{ тл}$, то при $B_0 = 0,8 \text{ тл}$ и размерах волновода $11 \times 5,5 \text{ мм}$ $-\Delta P_g / P_g = 1 \cdot 10^{-2}$ (без учета эффекта насыщения). Следует отметить, что при том же значении поля B_0 и ширине резонансной линии ЯМР протонов воды - $1 \cdot 10^{-4} \text{ тл}$, для образца объемом 1 см^3 $-\Delta P_g / P_g = 1 \cdot 10^{-5}$. Таким образом, сигнал ЭПР даже при использовании широкополосной поглощающей ячейки вполне достаточен и в тысячи раз больше сигнала ЯМР.

Относительная погрешность стабилизации магнитного поля может быть определена из следующего выражения

$$\pm \left(\frac{\Delta B_0}{B_0} \right)_{\max} = \delta_M + \frac{\Delta f_0}{f_0} + \frac{\Delta B}{B_0 k_{CT}}$$

где δ_M - ошибка определения середины резонансной линии ЭПР, $\frac{\Delta f_0}{f_0}$ - нестабильность частоты клистронного генератора; ΔB - возможные отклонения магнитного поля от номинального значения B_0 при выключенной системе стабилизации; k_{CT} - коэффициент усиления цепи обратной связи.

Как и в ядерных стабилизаторах магнитного поля, середина резонансной линии ЭПР определяется посредством "дифференцирования линии" /8/ и детектирования резонансного сигнала фазочувствительным усилителем. Величина случайной погрешности определения момента перехода производной линии через нуль в этом случае равна

$$\delta_M = \frac{1}{k_0} \left(\frac{\Delta B_d}{B_0} \right),$$

где k_0 - отношение амплитуды полезного сигнала к уровню шумов, ΔB_d - ширина резонансной линии ЭПР для используемого образца.

В описываемом приборе образец изготовлен из дифенилкрилгидразила с шириной линии $\Delta B_d = 6 \cdot 10^{-4} \text{ тл}$. Отношение сигнал/шум при $B_0 > 0,5 \text{ тл}$ и объеме образца $0,075 \text{ см}^3$ обычно не менее 100 ± 300 , следовательно, $\delta_{M \max} = 1 \cdot 10^{-3} \%$.

Вторым источником погрешности стабилизации является нестабильность частоты клистронного СВЧ генератора. Поскольку нестабильность клистронного генератора даже при хорошей стабилизации источников питания значительно превышает допустимую для рассматриваемого прибора величину, его частота стабилизируется системой автоматической подстройки частоты (АПЧ) по резонансной частоте пассивного эталонного резонатора. Собственная частота этого резонатора слабо зависит от внешних условий. Его ТКЧ составляет $1 \cdot 10^{-5}$ на 1°C , а нестабильность частоты, обусловленная изменением влажности и давления, имеет в обычных лабораторных условиях тот же порядок. Если температура, давление и влажность среды, в которой расположен эталонный резонатор, могут сильно меняться, то он должен быть термостатирован и герметизирован.

На рис. 3 показана принципиальная схема системы АПЧ клистронного генератора. Для получения сигнала ошибки применяется модуляция частоты клистронного генератора подачей на отражатель клистрона синусоидального модулирующего напряжения с частотой 50 кгц и амплитудой 0,05 в. Частотно-модулированные колебания СВЧ через направленный ответвитель (7) поступают в эталонный объемный резонатор (8), на выходе которого включен детектор (9). С нагрузки детектора сигнал ошибки поступает на резонансный усилитель каскадного типа с трансформаторным выходом, имеющий усиление $\sim 10^3$. Фазочувствительный усилитель (T_3, D_1-D_4) имеет коэффициент преобразования переменного напряжения в постоянное 40 и линейен в диапазоне выходных напряжений ± 10 в. Генератор модулирующей частоты 50 кгц (T_4) собран по схеме емкостной трехточки с контуром в цепи коллектора. Напряжение модуляции подается на отражатель через разделительный трансформатор Tr_3 и фазовращатель C_9, R_{13} , необходимый для согласования фаз входного и опорного напряжения. Питание фазочувствительного усилителя опорным напряжением осуществляется двухтактным выходным каскадом (T_6, T_7). Общий коэффициент стабилизации системы АПЧ составляет ~ 100 .

Третьим фактором, определяющим степень стабилизации магнитного поля B_0 , является величина коэффициента усиления системы стабилизации $k_{ст}$. Отклонение поля электромагнита от требуемого значения B_0 вызывается нестабильностью тока, питающего обмотки электромагнита, гистерезисом, механическими деформациями магнитной системы и другими причинами. У обычных Ш - и С - образных электромагнитов при стабилизации тока питания с точностью $0,01 \pm 0,05\%$ суммарная нестабильность магнитного поля из-за перечисленных выше причин не превышает 0,1%. Следовательно, для достижения относительной нестабильности $(\Delta B_0 / B_0) = 1 \cdot 10^{-3}\%$ необходимо иметь $k_{ст} = 100$.

Принципиальная схема блока, вырабатывающего управляющее напряжение, показана на рис. 4. В режиме стабилизации поля модуляционные катушки питаются низкочастотным генератором опорного напряжения фазочувствительного усилителя, работающим на частоте 5 кгц. Сигнал ЭПР, выделенный диодным детектором (D_5), усиливается резонансным усилителем (T_1) с $k \approx 100$ и поступает на фазовый детектор (T_2, D_1-D_4), имеющий коэффициент преобразования ~ 40 . С выхода фазового детектора управляющее напряжение через корректирующие RC цепочки, необходимые для обеспечения устойчивости всей системы регулирования, поступает на вход регулируемого источника питания корректирующих катушек. Необходимые характеристики регулирующего блока зависят от параметров корректирующих катушек и максимально возможных величин ΔB . Регулирующий блок, схема которого приведена на рис. 5, используется в системе стабилизации поля электромагнита с диаметром полюсных наконечников, равным 20 см, и позволяет получать $I_k = \pm 1$ а при сопротивлении катушек $R_k = 2$ ом. При необходи-

мости регулирующей блок может быть выполнен на большую или меньшую выходную мощность.

При проверке и настройке стабилизатора магнитное поле модулируется с частотой 50 гц, а сигнал ЭПР наблюдается на экране контрольного осциллографа.

Весь диапазон стабилизируемых прибором магнитных полей от 0,6 до 1,37 тл разбит на два поддиапазона: 0,6-0,97 тл и 0,97-1,37 тл. В первом поддиапазоне используется комплект волноводных устройств сечением 5,5x11 мм. Размеры образца 5x5x3 мм³. Источником электромагнитного излучения служит клистронный генератор. Во втором поддиапазоне применяются волноводные устройства сечением 3,4x7,2 мм и генератор ГЗ-30. Размеры образца 3x3x3 мм³.

Конструктивные данные трансформаторов и дросселя в схемах, показанных на рис. 3 и 4, представлены соответственно в таблицах 1 и 2.

Т а б л и ц а 1

Обозначение на схеме	Количество витков	Провод	Сердечники	Колич. колец
Tr_1	$W_1 = 150, W_2 = 15$		Ферритовые кольца (ф600)	1
Tr_2	$W_1 = W_2 = 50, W_3 = 80$	ПЭЛШО $\phi 0,21$	Двнутр. = 10 мм Двнеш. = 22 мм h = 7 мм	2
Tr_3	$W_1 = 150, W_2 = W_3 = 80$			2
Dr_1	$W = 160$			1

Т а б л и ц а 2

Tr_1	$W_1 = 210, W_2 = 30$		Ферритовые кольца (ф600)	2
Tr_2	$W_1 = W_2 = W_3 = 100$	ПЭЛШО $\phi 0,31$	Двнутр. = 10 мм Двнеш. = 22 мм h = 7 мм	3
Tr_3	$W_1 = 250, W_2 = W_3 = 23$			2
Tr_4	$W_1 = 200, W_2 = 100$			3

Коэффициент стабилизации описываемой системы равен $70 \div 80$, следовательно, в комплексе с широко используемыми промышленными стабилизаторами тока стабилизатор поля с датчиком на ЭПР позволяет удерживать заданное значение абсолютной величины магнитного поля электромагнитов с точностью $(1 \div 3) \cdot 10^{-3}\%$.

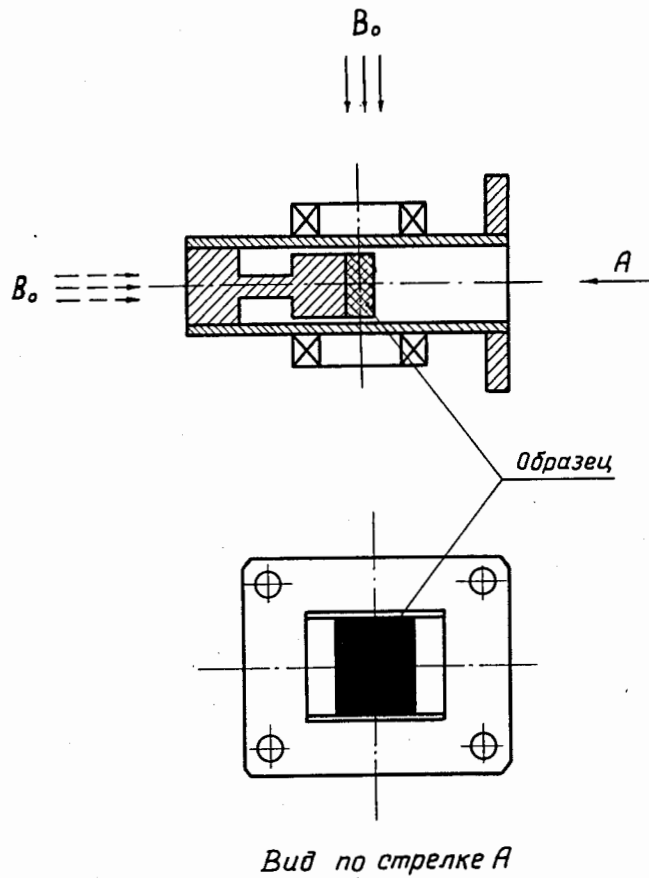


Рис. 2.

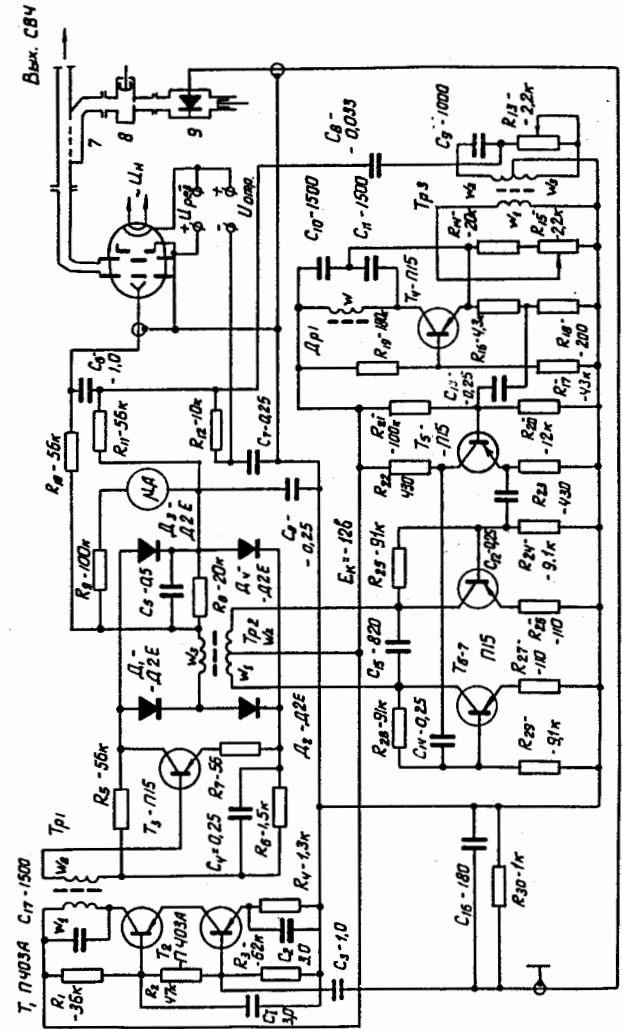


Рис. 3.

