

сообщения  
объединенного  
института  
ядерных  
исследований  
дубна

13-85-303

Ю.В.Никитенко, А.Б.Роганов, Ю.В.Таран

МНОГОКАНАЛЬНЫЙ СТАБИЛИЗАТОР  
МАГНИТНОГО ПОЛЯ  
В МИКРОТЕСЛОВОМ ДИАПАЗОНЕ

1985

## ВВЕДЕНИЕ

Созданию стабильного магнитного поля с индукцией  $0,5 \div 5$  мкТ внутри ферромагнитного экрана <sup>/1/</sup> посвящены работы <sup>/2-5/</sup> В <sup>/2/</sup> был исследован стабилизатор магнитного поля с аппаратурой, выделяющей  $S_z$ -сигнал <sup>/6/</sup> оптически ориентированных атомов цезия. Стабилизатор имел в интервале частот  $10^{-4} \div 1$  Гц уровень собственных шумов  $1 \text{ нТ} \cdot \text{Гц}^{-1/2}$ . Предельное значение статического коэффициента стабилизации линейно зависело от постоянной времени корректирующей интегрирующей цепочки в интервале  $1 \div 50$  с с производной  $20 \text{ с}^{-1}$ .

В <sup>/3/</sup> исследовался двухканальный стабилизатор, предназначенный для стабилизации среднего значения магнитного поля. В стабилизаторе производилось суммирование синусоидальных амплитудно-модулированных сигналов от двух  $S_z$ -первичных преобразователей /ПП/, разнесенных на некоторое расстояние. Коэффициент стабилизации среднего по двум точкам магнитного поля был не менее десяти.

В <sup>/4/</sup> исследован двухкаскадный стабилизатор магнитного поля. Показано, что коэффициент стабилизации магнитного поля в точках размещения первичного преобразователя внутреннего каскада равен произведению коэффициентов стабилизации отдельных каскадов. В интервале частот изменения магнитного поля  $10^{-3} \div 3 \cdot 10^{-3}$  Гц коэффициент стабилизации достигал величины  $10^5$ .

В настоящей работе описывается многоканальный стабилизатор магнитного поля, обеспечивающий более высокий коэффициент стабилизации среднего значения магнитного поля в микротесловом диапазоне.

## 1. АППАРАТУРА

Блок-схема стабилизатора показана на рис.1. В качестве первичных преобразователей стабилизатора использовались датчики 1 квантовых магнитометров с  $S_z$ -сигналом и датчики 2 квантовых магнитометров с  $S_x$ -сигналом <sup>/6/</sup>. Для осуществления магнитного резонанса в ПП при одинаковом значении магнитного поля использовались катушки 3, создающие дополнительное магнитное поле. На ПП 2, кроме того, устанавливались компенсационные катушки 4 для осуществления схемы двухкаскадного стабилизатора <sup>/4/</sup> магнитного поля. Оптическая накачка ячеек ПП осуществлялась спектральной лампой /СЛ/ 5, помещенной в блок спектральной лампы

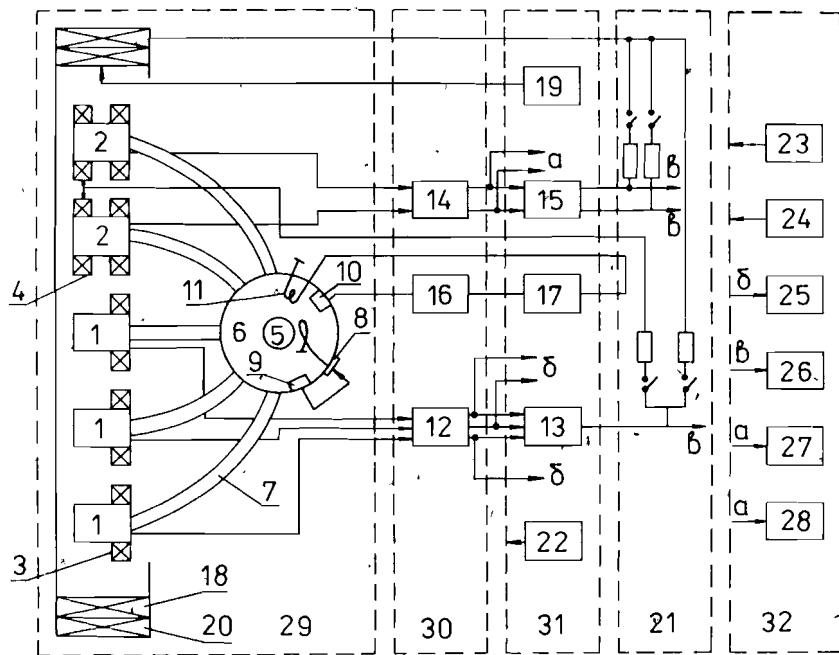


Рис. 1. Блок-схема многоканального стабилизатора.

/БСЛ/ 6. Связь БСЛ с ПП осуществлялась с помощью гибких световодов 7 длиной 1 м. Поджиг СЛ производился от генератора 8, размещенного в БСЛ. Мощность генератора стабилизировалась сигналом отрицательной обратной связи с фотодиода 9. В БСЛ также размещены термодатчик 10 и нагреватель 11 схемы термостабилизации СЛ.

Сигналы с ПП 1 усиливались в трехканальном блоке 12 предварительных усилителей и поступали в блок 13 преобразования  $S_z$ -сигналов, в котором происходило их суммирование, дальнейшее усиление и синхронное детектирование. Сигналы с ПП 2 поступали в двухканальный блок 14 усилителей сигнала и далее в двухканальный блок 15 преобразования  $S_x$ -сигналов, где производилось их фазовое детектирование и дальнейшее усиление.

Сигнал от термодатчика 10 усиливался предварительным усилителем 16 и поступал в блок термостатирования 17, к выходу усилителя мощности блока 17 подключен нагреватель 11 спектральной лампы. Катушки 18 для создания рабочего магнитного поля  $0,5 \div 5$  мкТ подключались к источнику 19 стабильного тока. Подключение катушки обратной связи 20, а также катушек 4 к выходам блоков преобразования сигналов осуществлялось через переходный блок 21. Подключение или отключение катушек 4 позволяло осу-

ществлять различные схемы стабилизатора. В частности, при отключенных катушках 4 реализуется параллельная схема включения всех пяти каналов по отношению к входному сигналу. При подключении катушек 4 к выходу блока 13 и при соответствующем подборе их коэффициентов передачи производится компенсация сигнала  $S_z$ -каналов на  $S_x$ -первичных преобразователях, что соответствует осуществлению последовательной схемы стабилизатора или так называемого двухкаскадного стабилизатора, в котором  $S_x$ -каналы образуют внешний каскад, а  $S_z$ -каналы - внутренний.

Питание модуляционных катушек ПП 1 осуществлялось генератором 22 синусоидального сигнала частотой 28 Гц. Питание катушек, создававших резонансное осциллирующее магнитное поле в ПП 1, осуществлялось генератором 23 /ГЗ-105/. Опорный сигнал в фазовый детектор поступал от генератора 24 /ГЗ-110/. Контроль работы стабилизатора осуществлялся с помощью вольтметров 25 и 26, частотомера 27 и осциллографа 28. Вся аппаратура стабилизатора размещена внутри экрана 29, вне экрана на его крышке 30, в крышке КАМАК 31, переходном блоке 21 и стойке 32.

Магнитоочувствительным элементом первичного преобразователя  $S_z$ -сигнала /рис.2/ является ячейка поглощения 1, насыщенная парами  $Cs^{133}$ . Циркулярная поляризация света осуществляется поляризатором 2, состоящим из поляроида плоскополяризованного света и четвертьволновой пластины. Настройка поляризатора осуществляется через отверстие 3 установкой в определенное положение относительно друг друга его элементов. Для создания параллельного потока света используется оптическая система 4, а для фокусировки на фотодиод прошедшего через ячейку света оптическая система 5. Оптические системы помещены в отдельные корпуса 6 и 7, выполненные из эбонита, в пазах корпусов размещены катушки 8, 9, 10, служащие для создания резонансного, модулирующего и дополнительного магнитных полей. На корпусе 11 ячейки поглощения, выполненном также из эбонита, размещается пара резонансных катушек 12. Оптические системы, поляриод, ячейка поглощения и фотодиод 13 образуют оптическую ось симметрии ПП. Конструктивная ось симметрии ПП задается кожухом 14, крепление к которому осуществляется с помощью дисков 15, 16. Кожух и диски изготовлены из оргстекла. На диске 15 установлены электрические разъемы, выполненные из немагнитных материалов. В наконечнике 17 закрепляется световод 18.

Основным элементом блока спектральной лампы /рис.3/ является лампа 1, представляющая собой стеклянный баллон диаметром 10 мм, заполненный металлическим  $Cs^{133}$  в количестве, достаточном для образования насыщенных паров при температуре  $120 \div 150^\circ C$ . Лампа находится в высокочастотном поле контура 2, настроенного на частоту около 80 МГц. Генератор выполнен по схеме, разработанной А.Н.Козловым<sup>44</sup>. Выходная мощность генератора составляет  $3 \div 8$  Вт и зависит от состояния СЛ. БСЛ имеет шесть отводов 3, в пять из них устанавливаются световоды. В шестом отводе БСЛ

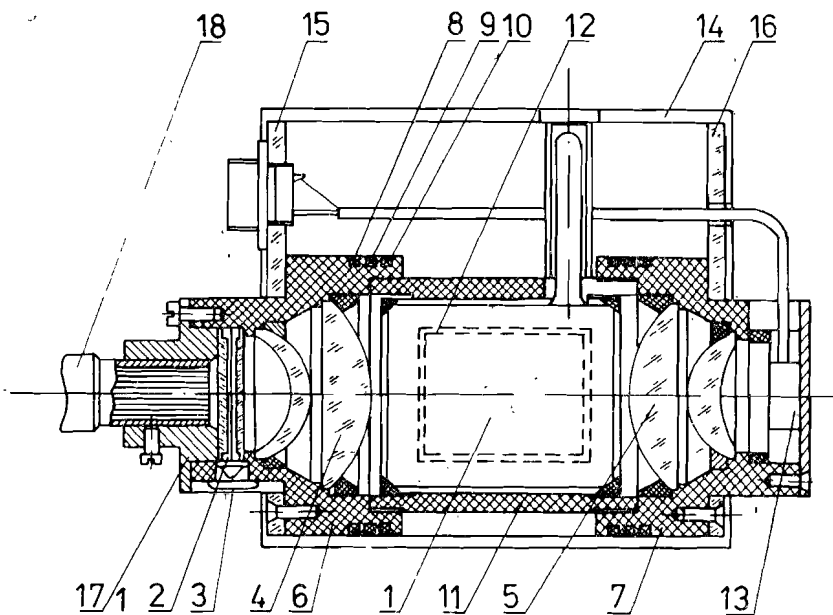


Рис. 2. Первичный преобразователь стабилизатора с  $S_z$ -сигналом.

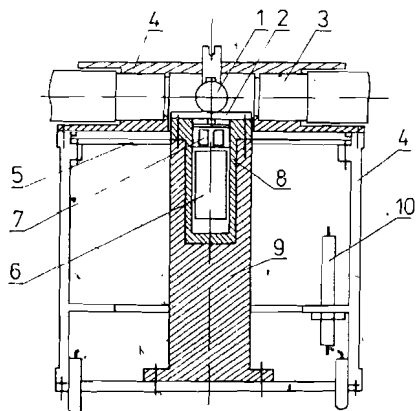


Рис. 3. Блок спектральной лампы.

Размещается фотодиод схемы стабилизации светового потока СЛ. Регулировка светового потока через ячейку поглощения осуществляется путем изменения расстояния в диапазоне  $15 \pm 25$  мм от торца световода до центра СЛ. Корпус БСЛ 4 выполнен из латуни и обеспечивает экранирование высокочастотного поля контура и теплоотвод от мощных транзисторов высокочастотного генератора 5. Нагреватель СЛ выполнен из манганинового провода диаметром 0,2 мм и намотан бифилярно на латунный стакан 6. В стакане установлен термодатчик схемы термостатирования лампы. Стакан

имеет также выполненный из бронзы зажим 7 для крепления ламп с длинным отростком. Термоизоляция нагревателя осуществляется выполненными из тефлона стаканом 8 и держателем 9. Для подавления высокочастотных помех в цепях постоянного тока установлены LC-фильтры с проходными конденсаторами 10, которые смонтированы в корпусе БСЛ.

Схема термостатирования спектральной лампы регулирует величину переменного тока в нагревателе в зависимости от сигнала термодатчика БСЛ. Термодатчиком служит низкочастотный диод КД-102А. Частота переменного тока 100 кГц в нагревателе выбрана намного превышающей частоту резонансного поля в ПП, что исключает сдвиг резонанса от магнитного поля, создаваемого током в нагревателе. В табл.1 приведены данные о стабильности светового потока  $J_{св}$  излучаемого СЛ, из которой видно, что включение термостата несколько улучшает стабильность в низкочастотной области.

Таблица 1

| $\Delta f$ , Гц    | $3 \cdot 10^{-4} \div 3 \cdot 10^{-3}$ | $3 \cdot 10^{-3} \div 3 \cdot 10^{-2}$ | $3 \cdot 10^{-2} \div 3 \cdot 10^{-1}$ |
|--------------------|--|--|--|
| Термостат<br>выкл. | $3 \cdot 10^{-4}$                      | $8 \cdot 10^{-5}$                      | $7 \cdot 10^{-5}$                      |
| Термостат<br>вкл.  | $2 \cdot 10^{-4}$                      | $8 \cdot 10^{-5}$                      | $7 \cdot 10^{-5}$                      |

$\Delta J/J$  - относительная среднеквадратичная нестабильность интенсивности светового потока  $J$  спектральной лампы с малым отростком.

Предварительный усилитель  $S_z$ -сигнала выполнен по принципу преобразователя ток - напряжение<sup>/7/</sup> с компенсацией постоянной составляющей тока фотодиода ПП. Коэффициент преобразования предусилителя на частоте 28 Гц составляет 50 мВ/мкА, полоса пропускания предусилителя - 100 Гц. Для выравнивания коэффициентов передачи  $S_z$ -каналов в предусилителе предусмотрена регулировка коэффициента усиления.

Блок преобразования  $S_z$ -сигналов содержит три усилителя синусоидального сигнала, сумматор с выходов усилителей, синхронный детектор и усилитель постоянного тока /УПТ/. Усилители имеют полосу пропускания 7,5 Гц при частоте 28 Гц и регулируемый коэффициент усиления в диапазоне  $3 \div 1,5 \cdot 10^4$ . Синхронный детектор выполнен на основе динамических запоминающих устройств<sup>/8/</sup>. Коэффициент передачи цепи синхронный детектор - УПТ равен 0,2. На входе УПТ включена пропорционально-интегрирующая цепочка. Постоянные времени цепочки могут быть выбраны с помощью переключателя блока. Для настройки и контроля работы каналов в блоке

предусмотрена возможность подключения к сумматору каналов в любой комбинации.

Предусилитель  $S_x$ -сигнала выполнен на операционных усилителях /ОУ/ типа К55УД2 по схеме двухкаскадного усилителя с эмиттерным повторителем на выходе. Полоса пропускания предусилителя - 150 кГц, коэффициент усиления сигнала частотой  $1 \div 20$  кГц и амплитудой 0,5 мВ составляет 2000.

Блок преобразования  $S_x$ -сигнала содержит два канала, каждый из которых состоит из масштабного усилителя, фазового детектора и усилителя постоянного тока. Фазовый детектор /9/ выполнен по ключевой схеме на МОП-транзисторах /переключатель четырехканальный К168КТ2А/. Масштабный усилитель позволяет регулировать коэффициент передачи устройства в диапазоне  $1 \div 16$ . Усилитель постоянного тока выполнен на прецизионном операционном усилителе типа К140УД13, реализующем принцип МДМ.

Генератор модуляции имеет частоту сигнала 28 Гц. Блок содержит четыре выхода. Фаза сигнала на трех выходах регулируется относительно четвертого в диапазоне  $3 \div 150^\circ$ . Амплитуда сигнала при изменении его фазы в указанном диапазоне изменяется в пределах  $\pm 0,9\%$ .

Источник питания катушек рабочего магнитного поля содержит стабилизатор напряжения на ОУ и преобразователь "Напряжение - ток". Стабильность тока определяется параметрами стабилизатора Д818Е, запитанного от генератора постоянного тока на полевом транзисторе. В табл.2 приведены данные о стабильности тока в катушках в начале и середине диапазона работы стабилизатора поля.

Таблица 2

| $\Delta f$ , Гц | $3 \cdot 10^{-4} \div 3 \cdot 10^{-3}$ | $3 \cdot 10^{-3} \div 3 \cdot 10^{-2}$ | $3 \cdot 10^{-2} \div 3 \cdot 10^{-1}$ |
|-----------------|--|--|--|
| $I = 0,9$ мА    | $8,8 \cdot 10^{-6}$                    | $2,9 \cdot 10^{-6}$                    | $7,2 \cdot 10^{-6}$                    |
| $I = 3$ мА      | $5 \cdot 10^{-5}$                      | $10^{-5}$                              | $2 \cdot 10^{-5}$                      |

$\delta I / I$  - относительная среднеквадратичная нестабильность тока в катушке, создающей рабочее магнитное поле с индукцией 0,6 и 1,9 мкТ соответственно.

## 2. ИСПЫТАНИЯ СТАБИЛИЗАТОРА

### а/ Магнитная обстановка

Испытания стабилизатора проводились в ферромагнитном экране /1/, подавлявшем геомагнитное поле в  $8 \cdot 10^3$  раз. В магнитоспокойное время, когда нет близко расположенных источников

магнитного поля, вариации магнитного поля в экране на временных участках достаточно большой длительности являются стационарным случайным процессом, для описания которого используем спектральную плотность  $S(f)$  магнитных помех. Измерения спектральной плотности в интервале частот изменения магнитного поля  $10^{-4} \div 10^{-1}$  Гц производились  $S_z$ -магнитометром / Экспериментальные данные для продольной /вдоль оси z экрана/ компоненты магнитного поля, полученные для центра экрана, в указанном диапазоне частот  $f$  аппроксимируются следующей зависимостью:

$$S(f) = 200 + \frac{25}{5 \cdot 10^{-6} + f^2} \quad /1/$$

где  $S$  и  $f$  даны в единицах  $\text{нТ}^2 \cdot \text{Гц}^{-1}$  и Гц соответственно.

Пространственная неоднородность характеристик экрана /1/, а также наличие вблизи экрана ферромагнитных масс приводит к неоднородному распределению амплитуды помехи в экране. Для измерения спектральной плотности градиента продольной компоненты поля использовались два  $S_z$ -магнитометра, датчики которых разносились на расстояние  $\Delta z$  при измерении градиента вдоль оси  $z$  или на расстояние  $\Delta r$  при измерении градиента перпендикулярно оси  $z$ , а выходы магнитометров были заведены на схему вычитания сигналов. Экспериментальные данные измерений в первом случае аппроксимируются зависимостью:

$$S_{\Delta z}(f) = \frac{1,5 \cdot 10^{-3}}{3 \cdot 10^{-5} + f^2} \quad /2/$$

для  $\Delta z = 30 \div 100$  см, а во втором случае - зависимостью:

$$S_{\Delta r}(f) = \frac{3 \cdot 10^{-3}}{3 \cdot 10^{-5} + f^2} \quad /3/$$

для  $\Delta r = 9 \div 41$  см /при внутренних размерах экрана  $\phi 94$  см и  $l = 2$  м/. Здесь  $S_{\Delta z}$  и  $S_{\Delta r}$  даны в единицах  $\text{нТ}^2 \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{Гц}^{-1}$ , а  $f$  - в Гц.

### б/ Одноканальный $S_z$ -стабилизатор

Одной из основных характеристик стабилизатора является спектральная плотность собственных шумов  $S_c(f)$ , которая определяется: 1/ колебаниями частоты прецессии,  $f_0$  спинов атомов цезия в ячейке поглощения ПП под действием флуктуаций таких аппаратурных параметров /А/, как интенсивность светового потока ( $J_{\text{св}}$ ), и амплитуд резонансного осциллирующего ( $A_p$ ) и модулирующего ( $A_m$ ) полей; 2/ флуктуациями частоты  $f_p$  резонансного осциллирующего поля и 3/ техническим шумом, существующим и без резонанса в ПП. Отсюда имеем:

$$S_c(f) = S_{\Sigma}(f) + S_{f_p}(f) + S_0(f), \quad /4/$$

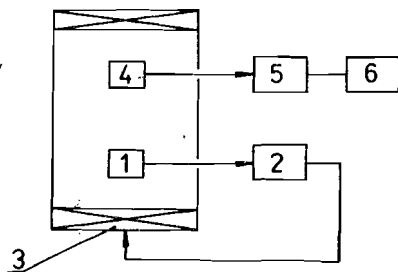
где выделен вклад аппаратных параметров А:

$$S_{\Sigma}(f) = S_J(f) + S_{A_p}(f) + S_{A_M}(f). \quad /5/$$

Измерения спектральной плотности шума, проводившиеся на частоте осциллирующего поля, значительно превышавшей частоту прецессии, дали в интервале  $10^{-4} \div 1$  Гц не зависящее от частоты значение  $S_0(f) = 80 \text{ нТ}^2 \cdot \text{Гц}^{-1}$ .

Для определения составляющих  $S_{\Sigma}(f)$  были измерены частотные зависимости дисперсии  $D_A(f)$  флуктуаций аппаратных параметров А и зависимости сдвига частоты прецессии  $\Delta f_0$  при изменении параметра А на величину  $\Delta A$  от частоты  $f_0$  или, что то же самое, от индукции рабочего поля Н. Поскольку наблюдаемый сигнал от оптически ориентированных атомов  $\text{Cs}^{133}$  отображает огибающую серии зеемановских компонент, неразрешенных в условиях малых полей, то следует ожидать линейную зависимость  $\Delta f_0 / \Delta A$  от Н при значениях, больших ширины огибающей  $\sim 0,03 \text{ мкТ}$ .

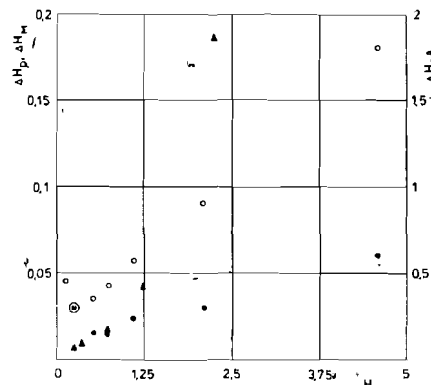
Рис.4. Схема измерения сдвига частоты прецессии в  $S_z$ -стабилизаторе: 1 - первичный преобразователь стабилизатора, 2 - электронная аппаратура стабилизатора, 3 - катушка обратной связи, 4 - датчик  $S_x$ -магнитометра, 5 - электронная аппаратура  $S_x$ -магнитометра, 6 - частотомер.



Измерения сдвига частоты прецессии были выполнены в диапазоне полей 0,1-5 мкТ по схеме, показанной на рис.4. Изменение величины параметра А осуществлялось не более, чем на 10%. Возникающее при этом изменение частоты  $\Delta f_0$  приводило к изменению магнитного поля катушки обратной связи стабилизатора, которое регистрировалось  $S_x$ -магнитометром; датчик его размещался рядом с ПП стабилизатора. На рис.5 приведены зависимости сдвига /в единицах поля/ при 10% изменении интенсивности светового потока и амплитуд осциллирующего и модулирующего полей. Вопреки ожиданиям зависимость для светового потока оказалась квадратичной. Возможно, здесь проявился сдвиг, обусловленный смешиванием g-факторов основного и возбужденного состояний цезия, зависящего от величины поля.

Для амплитуд  $A_p$  и  $A_M$  наблюдаются линейные зависимости сдвига от Н, за исключением области малых полей. В частности, при та-

Рис.5. Зависимость сдвига частоты прецессии в единицах поля  $\Delta H_p$ ,  $\Delta H_M$ ,  $\Delta H_{св}$ ,  $S_z$ -стабилизатора при 10%-изменении амплитуд резонансного осциллирующего /темные кружки/ и модулирующего /светлые кружки/ полей и интенсивности светового потока /треугольники/ соответственно от напряженности магнитного поля Н,  $\Delta H$  - нТ, Н - мкТ.



ких полях должен быть виден сдвиг за счет резонансного осциллирующего поля /сдвиг Блоха-Зигерта/:

$$\frac{\Delta f_0}{f_0} = \frac{A_p \Delta A_p}{2H^2}. \quad /6/$$

Численная оценка для рабочего значения  $A_p = 10 \text{ нТ}$  дает  $\Delta H_p = 0,05 \text{ нТ}$  при  $H = 100 \text{ нТ}$ , что близко к экспериментальному значению.

Известные значения  $D_A(f)$  и  $\Delta f_0 / \Delta A$  позволяют вычислить спектральную плотность шумов, обусловленную флуктуациями параметра А:

$$S_A(f) = (\Delta f_0 / \Delta A)^2 D_A(f). \quad /7/$$

В табл.3 приведены значения  $S_J(f)$  и  $S_{\Sigma}(f)$  для  $H = 1 \text{ мкТ}$ , из которой видно, что при частотах ниже  $10^{-2}$  Гц основной вклад в спектральную плотность колебаний частоты прецессии  $S_{\Sigma}(f)$  вносит нестабильность светового потока. При более высоких частотах превалирует нестабильность аппаратных параметров А, при этом значения  $S_J(f)$  и  $S_{\Sigma}(f)$  сильно уменьшаются. В целом же спектральная плотность  $S_c(f)$  во всем диапазоне изменения поля определяется техническим шумом  $S_0(f)$ .

Таблица 3

| $\Delta f$ , Гц                    | $3 \cdot 10^{-4} \div 10^{-3}$ | $10^{-3} \div 3 \cdot 10^{-3}$ | $3 \cdot 10^{-3} \div 10^{-2}$ | $10^{-2} \div 3 \cdot 10^{-2}$ | $3 \cdot 10^{-2} \div 10^{-1}$ |
|------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| $S_J$ , нТ <sup>2</sup> /Гц        | 7,5                            | 0,8                            | 0,07                           | 0,025                          | 0,013                          |
| $S_{\Sigma}$ , нТ <sup>2</sup> /Гц | 8,2                            | 1                              | 0,15                           | 0,07                           | 0,04                           |

Другими важными характеристиками стабилизатора являются статический коэффициент передачи цепи разомкнутого стабилизатора  $K(0)$  и полоса удержания  $\Delta H_y$ . Известно, что максимальное значение  $K_M(0)$ , помимо прочих факторов, ограничивается устойчивостью стабилизатора. Для ее повышения использовалась коррекция амплитудно-фазовой характеристики стабилизатора с помощью пропорционально-интегрирующей цепочки в блоке преобразования  $S_z$ -сигнала. При постоянных времени цепочки 0,08 и 100 с было получено  $K_M(0) = 1,4 \cdot 10^4$ , которое более чем на порядок превышает ранее достигнутое значение<sup>7/2/</sup>. При этом значении  $K_M(0)$  и  $H = 1$  мкТ полоса удержания составила  $\Delta H_y \geq 2$  мкТ при симметричной расстройке относительно центра резонансной кривой на величину  $\Delta H_y / 2$ .

#### в/ Одноканальный $S_x$ -стабилизатор

Стабилизатор вследствие наличия фазового детектора является астатическим, поэтому эффективность коррекции амплитудно-фазовой характеристики стабилизатора определялась по максимально достижимой полосе удержания. Применение RC-цепочки, включенной последовательно с катушкой обратной связи, позволило при оптимальном значении ее постоянной времени  $3,5 \cdot 10^{-3}$  с довести полосу удержания до  $\Delta H_y = 300$  нТ. При этом значении полосы удержания был измерен коэффициент стабилизации  $\eta(f)$  магнитного поля по схеме, приведенной на рис.6. Магнитная помеха имитировалась катушкой, питаемой от генератора синусоидального сигнала с частотой  $0,05 \pm 20$  Гц и выполненной идентично катушке обратной связи стабилизатора. Наблюдаемая частотная зависимость  $\eta(f) = 100/f$  показывает, что стабилизация поля осуществляется до частот в несколько десятков герц. При частотах меньше 0,1 Гц этот стабилизатор обеспечивает большой коэффициент стабилизации по сравнению с описанным в<sup>7/10/</sup> парорубидиевым  $S_x$ -стабилизатором.

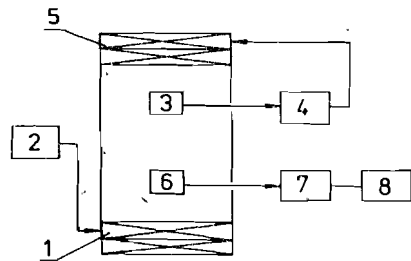


Рис.6. Схема измерения коэффициента стабилизации  $S_x$ -стабилизатора: 1 - катушка для создания магнитной помехи, 2 - генератор синусоидального сигнала, 3 - первичный преобразователь  $S_x$ -стабилизатора, 4 - электронная аппаратура стабилизатора, 5 - катушка обратной связи стабилизатора, 6 - датчик  $S_x$ -магнитометра, 7 - электронная аппаратура магнитометра, 8 - частотомер.

#### г/ Многоканальные схемы

Исследование трехканального  $S_z$ -стабилизатора показало, что собственный шум не изменился. Это говорит о том, что источником шума являются общие элементы каналов стабилизатора, вероятно, это блок спектральной лампы. Полученное максимально достижимое значение статического коэффициента передачи  $K_z(0) = 5 \cdot 10^3$  указывает на одинаковость амплитудно-фазовых характеристик  $S_z$ -каналов. Измерение спектральной плотности  $S'_K(f)$  колебаний коэффициента передачи позволило оценить его среднеквадратичное отклонение  $\delta K_z$  от среднего значения:

$$\delta K_z = \left( \int_{f_1}^{f_2} S'_K(f) df \right)^{1/2} \quad /8/$$

В полосе частот  $3 \cdot 10^{-4} - 10^{-1}$  Гц оно оказалось равным  $\delta K_z = 1,5 \cdot 10^{-2} K_z(0)$ .

По завершении всех предварительных этапов была реализована и исследована пятиканальная схема двухкаскадного стабилизатора, внутренний каскад которого содержит три  $S_z$ -канала, а внешний - два  $S_x$ -канала. В местах расположения  $S_x$ -датчиков фактически действует двухканальный  $S_x$ -стабилизатор, коэффициент стабилизации среднего по двум точкам магнитного поля которого должен быть равен удвоенному значению коэффициента стабилизации одноканального  $S_x$ -стабилизатора. Результаты измерения полосы удержания, давшие те же значения при вдвое меньших значениях коэффициентов передачи каналов, показывают, что экспериментальная ситуация близка к ожидаемой.

В местах расположения  $S_z$ -датчиков коэффициент стабилизации однородного магнитного поля должен быть равен произведению коэффициентов стабилизации внешнего и внутреннего каскадов. Однако в данном конкретном исполнении он был ограничен неоднородностью магнитного поля катушки обратной связи. Тем не менее, в интервале частот  $1 \div 2 \cdot 10^{-4}$  Гц было достигнуто значение  $2 \cdot 10^6$  /при  $K_z(0) = 5 \cdot 10^3$ /, что более чем на порядок превосходит результат в<sup>7/4/</sup>. Уровень собственных шумов стабилизатора составил  $\approx 9$  нТ·Гц<sup>-1/2</sup>.

В заключение отметим, что разработанная аппаратура позволила достичь таких высоких значений коэффициента стабилизации и динамического диапазона, что это открывает перспективу создания прецизионных стабилизаторов без использования ферромагнитных экранов. Реальность этой перспективы подкрепляется существующей возможностью накачки ячеек поглощения ПП более интенсивным светом, что позволит заметно уменьшить уровень собственных шумов стабилизатора.

Авторы благодарят А.Н.Козлова за полезные обсуждения и помощь при выполнении работы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеев Н.А. и др. ОИЯИ, Р13-9221, Дубна, 1975; Ю.В.Таран. ОИЯИ, Р13-9275, Дубна, 1975; Ю.В.Никитенко и др. ОИЯИ, Р13-10068, Дубна, 1976; Ю.В.Таран. ПТЭ, 1984, №6, с.170.
2. Никитенко Ю.В. и др. ОИЯИ, Р13-12037, Дубна, 1978; Козлов А.Н. и др. ПТЭ, 1981, №1, с.210.
3. Никитенко Ю.В. и др. ОИЯИ, Р13-12847, Дубна, 1979; Никитенко Ю.В. и др. В кн.: X Международный симпозиум по ядерной электронике. Дрезден, 1980 /аннотации докладов/. ZFK-413, Дрезден, 1980, с.16.
4. Козлов А.Н. и др. ОИЯИ, Р13-80-709, Дубна, 1980; Kozlov A.N. et al. Nucl. Instr. and Meth., 1982, 192, p.379; Козлов А.Н. и др. Авт.свид. СССР №913288. Бюл.ОИПОТЗ, 1982, №10, с.213.
5. Никитенко Ю.В. и др. В кн.: Методы и средства измерения параметров магнитного поля. Тезисы докладов 2-й Всесоюзной конференции. Изд-во ВНИИМ им.Д.И.Менделеева, Л., 1980.
6. Померанцев Н.М., Рыжков В.М., Скроцкий Г.В. Физические основы квантовой магнитометрии. "Наука", М., 1972.
7. Вендленд П.Г. Электроника, 1971, 11, с.30.
8. Николайчук О.Л. ПТЭ, 1978, №5, с.162.
9. Гавриленко В.И. и др. ПТЭ, 1979, №2, с.171.
10. Скрыников Р.Г. и др. Геофизическая аппаратура, 1972, №49, с.19.

Рукопись поступила в издательский отдел  
25 апреля 1985 года.

Никитенко Ю.В., Роганов А.Б., Таран Ю.В., 13-85-303  
Многоканальный стабилизатор магнитного поля  
в микротесловом диапазоне

Разработан и испытан пятиканальный двухкаскадный стабилизатор магнитного поля. В качестве первичных преобразователей стабилизатора использованы квантовые цезиевые магнитометры /КЦМ/ на оптической накачке, размещенные внутри многослойного ферромагнитного экрана. С тремя КЦМ на  $S_z$ -сигнале во внутреннем каскаде и двумя КЦМ на  $S_x$ -сигнале во внешнем каскаде достигнут коэффициент стабилизации  $2 \cdot 10^6$  в интервале  $1 \div 2 \cdot 10^{-4}$  Гц, при этом динамический диапазон стабилизатора составлял  $\pm 150$  нТ, а уровень собственных шумов  $- 9$  пТ  $\cdot$  Гц $^{-1/2}$ .

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1985

Перевод О.С.Виноградовой

Nikitenko Yu.V., Roganov A.B., Taran Yu.V. 13-85-303  
The Multichannel Magnetic Field Stabilizer  
in Micro-Tesla Range

The five-channel two-cascade magnetic field stabilizer has been developed and tested. Quantum cesium magnetometers (QCM) with optical pumping placed inside a ferromagnetic screen were used as primary converters of the magnetic field. Stabilization coefficient of  $2 \cdot 10^6$  in the  $(1 \div 2) \cdot 10^{-4}$  Hz range and its dynamical range  $\pm 150$  nT, and its own noise being  $9$  pT Hz $^{-1/2}$  has been obtained using three QCM with  $S_z$ -signal in the inner and two QCM with  $S_x$ -signal in outer cascades.

The investigation has been performed at the Laboratory of Neutron Physics, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1985