

СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА



СЗУ2ГЗ  
Н-623

P13 - 12037

2/10 79

Ю.В.Никитенко, А.Б.Роганов, Ю.В.Таран

1221 / 2-79

СТАБИЛИЗАЦИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ  
В ДИАПАЗОНЕ 1-10 мкТ  
С ПОМОЩЬЮ КВАНТОВОГО  
ЦЕЗИЕВОГО МАГНИТОМЕТРА

**1978**

P13 - 12037

Ю.В.Никитенко, А.Б.Роганов, Ю.В.Таран

СТАБИЛИЗАЦИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ  
В ДИАПАЗОНЕ 1-10 мкТ  
С ПОМОЩЬЮ КВАНТОВОГО  
ЦЕЗИЕВОГО МАГНИТОМЕТРА



Никитенко Ю.В., Роганов А.Б., Таран Ю.В.

P13 - 12037

Стабилизация магнитного поля в диапазоне 1-10 мкТ  
с помощью квантового цезиевого магнитометра

На базе квантового магнитометра с оптической накачкой паров цезия разработан стабилизатор магнитного поля напряженностью 1-10 мкТ с коэффициентом стабилизации 150 и динамическим диапазоном до 1,5-2 нТ. Кратковременные флуктуации магнитного поля, создаваемого коротким соленоидом и двумя корректирующими катушками в магнитном экране с внутренним объемом 1,5 м<sup>3</sup>, имеющим коэффициент ослабления магнитных помех 200-300, не превышают 1,5 нТ в полосе 1 Гц. Аппаратура предназначена для установки по поиску электрического дипольного момента нейтрона с помощью ультрахолодных нейтронов.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1978

Nikitenko Yu.V., Roganov A.B., Taran Yu.V.

P13 - 12037

Magnetic Field Stabilization within 1-10  $\mu$ T  
Range by means of Caesium Quantum Magnetometer

A magnetic field stabilizer was developed for the installation built up to measure the electric dipole moment of the neutron using ultracold neutrons. Mean square deviation of the magnetic field for a 100 sec period of time should not exceed 7 pT with IBR-2 reactor as a source.

The magnetic field stabilizer is based on the quantum magnetometer with optical orientation of atoms of caesium. It operates in the 1-10 mcT magnetic field. The magnetic field is created by a system of coils enclosed inside the ferromagnetic screen, screening coefficient being 200-300.

The stabilization factor of the regulator is 150. A dynamic range of 1 nT in a transmission band of 1 Hz makes it possible to reduce field fluctuations to 1.5-10 pT, i.e. within requirements.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1978

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящей работе описывается стабилизатор магнитного поля установки "Тристом", предназначенной для измерения электрического дипольного момента /ЭДМ/ нейтрона с помощью ультрахолодных нейтронов /УХН/ <sup>1,2/</sup>. В этой установке предъявляются достаточно высокие требования к стабильности магнитного поля, которые зависят, помимо прочих факторов, от потока УХН. При использовании установки "Тристом" на импульсном быстром реакторе ИБР-2 <sup>3/</sup> ожидаемая чувствительность за один цикл измерений\* равна  $2 \cdot 10^{-23}$  е.см, что приводит к оценке на допустимое за цикл среднеквадратичное изменение магнитного поля не более 7 нТ.

Ранее <sup>6-8/</sup> в ЛНФ для получения однородного магнитного поля в установке "Тристом", а также частичного ослабления вариаций геомагнитного поля /ГМП/ и промышленных помех был создан пятислойный цилиндрический пермаллоевый экран с внутренним объемом около 1,5 м<sup>3</sup>, внутри которого размещена магнитная система из короткого соленоида и нескольких катушек, проект которой обсуждался в <sup>9/</sup>.

Экран, ориентированный в горизонтальной плоскости своей осью перпендикулярно вектору локального ГМП

\*Цикл измерения ЭДМ состоит из двух идентичных полуциклов, отличающихся только направлением электрического поля относительно магнитного. Длительность полуцикла в установке "Тристом" равна 50-60 с при времени жизни УХН в накопительной камере около 35 с <sup>4,5/</sup>.

напряженностью около  $45 \text{ мкТ}$  и в таком положении размагниченный, имел<sup>/8/</sup> остаточное магнитное поле  $4-5 \text{ нТ}$  с уровнем флюктуаций в нерабочее время около  $0,1 \text{ нТ}$ , продольный /вдоль оси/ дифференциальный коэффициент экранирования /ДКЭ/ однородного магнитного поля  $k_{\parallel d} \approx 240$ , поперечный /перпендикулярно оси/ ДКЭ  $k_{\perp d} \approx 620$ , нормальный КЭ  $k_{\perp} \approx 8,3 \cdot 10^3$ .

При подмагничивании переменным магнитным полем, создаваемым путем пропускания тока промышленной частоты по проводнику, расположенному вдоль оси экрана, эффективность экрана была существенно увеличена. Причем для величины  $k_{\parallel d}$  как наиболее важной с точки зрения получения стабильного магнитного поля, получен коэффициент усиления 7 при токе 3 А.

С точки зрения получения стабильного магнитного поля при проведении эксперимента экран не обеспечивает требуемой защиты установки от вариаций ГМП и промышленных помех. В данном случае нужна электронная система для активной стабилизации рабочего магнитного поля установки. Принимая в качестве верхнего предела уровень помех от ГМП  $0,2-0,3 \text{ мкТ}$ <sup>/8/</sup>, получаем, что стабилизатор магнитного поля должен иметь динамический диапазон до  $1 \text{ нТ}$ , коэффициент стабилизации  $k_{\text{СТ}}$  не менее 150 и быстродействие не хуже  $1 \text{ с}$  /при работе с экраном без подмагничивания/.

Наиболее подходящим первичным преобразователем стабилизатора поля является квантовый магнитометр с оптической накачкой паров щелочных металлов<sup>/10/</sup>. Такому магнитометру свойственны широкий диапазон измеряемого магнитного поля:  $0,1 \text{ нТ}-1 \text{ мТ}$ <sup>/11,12/</sup>, высокая чувствительность к изменению магнитного поля:  $10^{-2}-10 \text{ нТ}$ <sup>/13,14/</sup>, относительная простота и компактность конструкции, возможность работы при комнатной температуре.

Нами был изготовлен магнитометр на парах цезия с  $S_z$ -сигналом<sup>/10/</sup> чувствительностью  $0,2 \text{ нТ}$  при постоянной времени  $10 \text{ с}$ , на основе которого разработан и запущен стабилизатор магнитного поля установки "Тристом" с коэффициентом стабилизации около 150 и динамическим диапазоном до  $1,5-2 \text{ нТ}$ , работающий в интервале полей  $1-10 \text{ мкТ}$ .

## 2. АППАРАТУРА

1. *Магнитометр.* Блок-схема магнитометра показана на *рис. 1*, где 1 - блок спектральной лампы, 2 - блок ячейки поглощения, оптически связанные через световод 3. В блоке 1 размещена спектральная цезиевая лампа 4 безэлектродной конструкции, возбуждаемая контуром 5 генератора 6 на частоте  $80 \text{ МГц}$ <sup>/15/</sup>. Свет от лампы 4, поляризованный по кругу с помощью инфракрасного поляроида 7 и четвертьволновой пластинки 8, осуществляет оптическую накачку атомов цезия в ячейке поглощения 9 блока 2.

Для наблюдения сигнала магнитного резонанса ориентированных атомов цезия на ячейку 9 накладывается переменное магнитное поле  $H_1$ , частота которого должна удовлетворять условию  $\nu / \text{кГц} = 3,4987 H_0 / \text{мкТ}$ , где  $H_0$  - напряженность постоянного магнитного поля в объеме ячейки, и магнитное поле модуляции  $H_M$  с частотой  $28 \text{ Гц}$  для сканирования резонансных условий. Направление поля  $H_1$  ортогонально направлению распространения света в ячейке поглощения. Поле  $H_1$  создается катушками 10, подключенными к генератору 11 с относительной стабильностью частоты  $10^{-8}$  и амплитуды выходного напряжения 1%; поле  $H_M$  - катушками 12, питаемыми от генератора 13.

Прошедший через ячейку 9 свет регистрируется фотоприемником 14, сигнал от которого усиливается узкополосным усилителем 15 с шириной полосы пропускания  $1,5-2 \text{ Гц}$  и подается на синхронный детектор 16. На выходе последнего находится переходный блок 17, с помощью которого производится регистрация сигнала вольтметром 18 и самопишущими приборами 19 и 20, а также коммутация выхода синхронного детектора с катушками обратной связи для формирования схемы стабилизации магнитного поля.

Для поддержания температурного режима блока спектральной лампы применена система терморегулирования /на *рис. 1* показана в виде блока 21/, обеспечивающая стабильность температуры около  $0,1^\circ \text{С}$  на уровне  $+40^\circ \text{С}$ . Питание термонагревателей производится от генератора переменного тока, частота которого лежит значительно



операционном усилителе типа К1УТ402 и обеспечивающего относительную стабильность тока не хуже  $\pm 2 \cdot 10^{-6}$ .

Магнитометрический комплекс установки "Тристом", состоящий из магнитного экрана, стабилизатора магнитного поля и системы размагничивания и подмагничивания экрана, показан на рис. 2.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Чувствительность магнитометра в центре резонансной линии может быть охарактеризована параметром  $\epsilon$ :

$$\epsilon \approx \frac{\Delta F \cdot N}{A \cdot S} = \delta H \cdot \frac{N}{S}, \quad /1/$$

где  $\Delta F$  - ширина резонансной линии в  $\text{рад} \cdot \text{с}^{-1}$ ,  $A$  - гиромагнитное отношение атомов цезия,  $S/N$  - отношение "сигнал-шум" в полосе пропускания тракта усиления и детектирования сигнала, ширина которой в основном определяется постоянной времени  $\tau$  синхронного детектора,  $\delta H$  - ширина линии в магнитных единицах. Отношение  $\delta H/S$  в ур. /1/ представляет собой величину, обратную коэффициенту передачи  $k_{\Pi}$  магнитометра, тогда  $\epsilon = N/k_{\Pi}$ . Измерение уровня шума  $N$  производилось вне резонансной линии, а коэффициент передачи в центре резонансной линии определялся из выражения  $k_{\Pi} = \Delta U / \Delta H_0$ , где  $\Delta H_0$  - известное изменение напряженности магнитного поля,  $\Delta U$  - соответствующее изменение выходного синхронного детектора.

Для настройки магнитометра в оптимальный режим работы были измерены зависимости коэффициента передачи  $k_{\Pi}$  от уровня радиочастотного  $H_1$  и модулирующего  $H_M$  полей. При значениях  $H_1$  и  $H_M$ , соответствующих максимальному значению  $k_{\Pi}$ , ширина резонансной линии была равна  $\approx 30 \text{ мТ}$ . В этих условиях было исследовано влияние полосы пропускания электронного тракта магнитометра на его чувствительность. На рис. 3 представлена зависимость  $\epsilon$  от постоянной времени  $\tau$  синхронного детектора в интервале 1-50 с, при этом  $\epsilon$  изменяется от 0,6 до 0,1 нТ, что в пределах экспериментальных ошибок согласуется с ожидаемым.

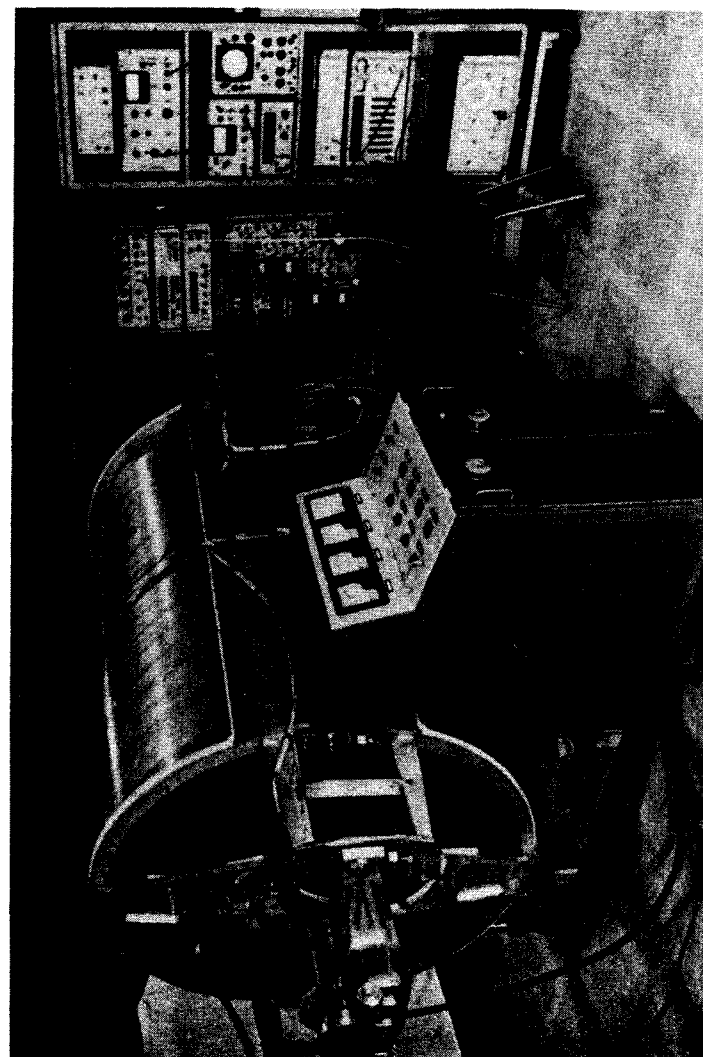


Рис.2. Магнитометрический комплекс установки "Тристом" в экспериментальной зале реактора ИБР-2.

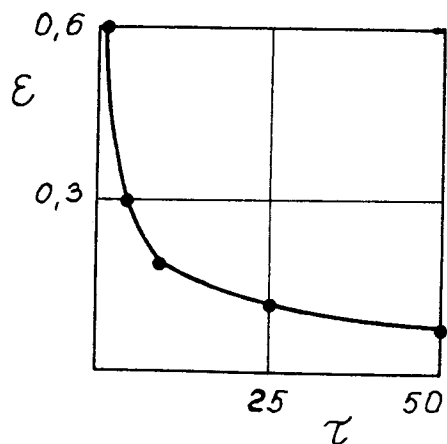


Рис.3. Зависимость параметра  $\epsilon$  / $nT$ / магнитометра от постоянной времени  $\tau$  /с/ синхронного детектора в магнитном поле 2 мкТ.

2. Коэффициент стабилизации. Для определения коэффициента стабилизации  $k_{СТ}$  измерялись коэффициенты передачи магнитометра  $k_{П}$  и стабилизатора  $k'_{П}$ , из которых рассчитывалось значение  $k_{СТ} = k_{П} / k'_{П}$ .

Так как схема стабилизатора представляет собой систему с отрицательной обратной связью, то его устойчивая работа определяется коэффициентом передачи обратной связи. Максимальный коэффициент стабилизации зависит от вида амплитудно- и фазочастотных характеристик цепи обратной связи. В нашем случае достижение максимального значения  $k_{СТ}$  связано с сужением полосы пропускания синхронного детектора. На рис. 4 показана зависимость максимально достижимого значения  $k_{СТ}^*$  от постоянной времени  $\tau$  синхронного детектора.

3. Динамический диапазон. Максимальный динамический диапазон стабилизатора определяется шириной линии поглощения, в пределах которой производится компенсация вариаций магнитного поля. С увеличением  $k_{П}$  диапазон стабилизатора уменьшается, что связано с уменьшением динамического диапазона тракта обратной связи и изменением условий стабильной работы замкнутой системы.

\* Под максимально достижимым значением  $k_{СТ}$  при данном  $\tau$  понимается значение  $k_{СТ}$ , при котором переуправление при переходном процессе  $\Delta T / T$  составляет 15%.

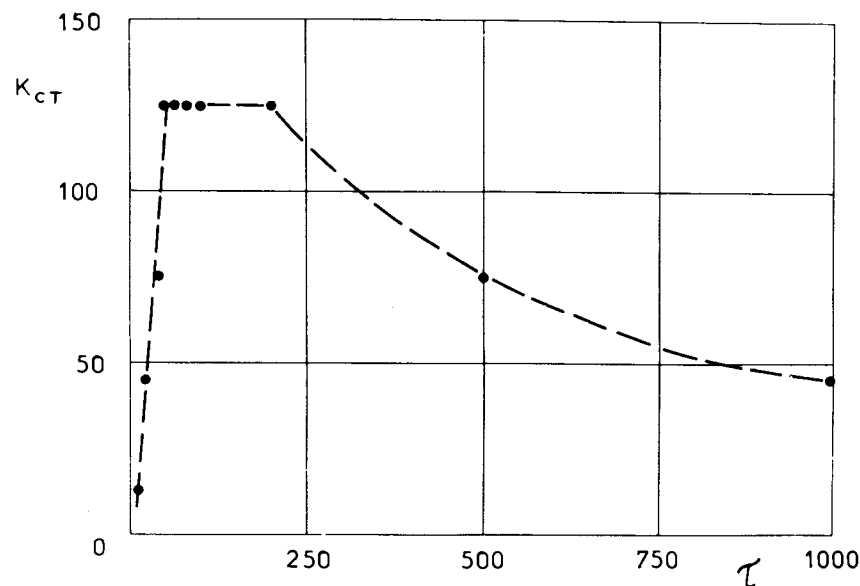


Рис.4. Зависимость максимально достижимого коэффициента стабилизации  $k_{СТ}$  от постоянной времени  $\tau$  /с/ синхронного детектора при амплитуде магнитной помехи 1 нТ.

На рис. 5 приведена зависимость динамического диапазона  $D$  от коэффициента стабилизации  $k_{СТ}$ , из которого следует, что стабилизатор удовлетворяет требованиям работы в установке "Тристом", сформированным во введении.

4. Быстродействие стабилизатора. На рис.6 приведена запись на самописце переходного процесса в стабилизаторе с постоянной времени синхронного детектора  $\tau = 50$  с при быстром включении и выключении дополнительного магнитного поля величиной 1 нТ. Можно отметить, что время нарастания не превышает 0,4 с, что соответствует полосе пропускания стабилизатора  $\approx 1$  Гц.

5. Дополнительные испытания. При долговременной работе стабилизатора важное значение имеют параметры, характеризующие влияние температуры окружающей среды и сетевого напряжения питания аппаратуры. Измерения показали, что температурный коэффициент составляет 1  $nT/^\circ C$ , а влияние изменения напряжения сети - 3  $nT/v$ , что легко ограничивается введением в состав аппаратуры стабилизатора напряжения сети.

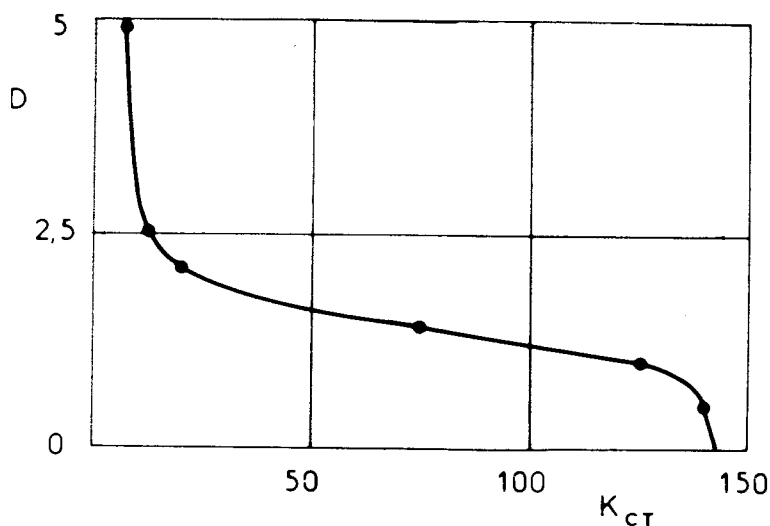


Рис.5. Зависимость динамического диапазона  $D$  /нТ/ стабилизатора от коэффициента стабилизации  $K_{ст}$  при постоянной времени синхронного детектора 50 с.

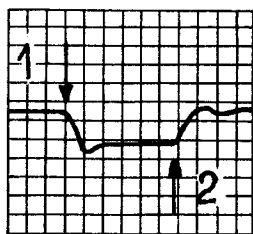


Рис.6. Запись реакции стабилизатора на самописце КСП-4 при включении /стрелка № 1/ и выключении /стрелка № 2/ магнитной помехи амплитудой 1 нТ. Коэффициент стабилизации - 150, постоянная времени - 50 с, скорость ленты самописца - 2 дел·с<sup>-1</sup>, цена деления - 4,5 нТ.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование магнитометрического комплекса установки "Тристом" на месте проведения работ в экспериментальном зале ИБР-2 показало, что в нерабочее время кратковременные флюктуации магнитного поля в полосе пропускания стабилизатора  $\approx 1$  Гц не превышают 1,5 нТ, а дрейф поля - не более 1 нТ за 10 мин /без подмагничивания экрана/. В рабочее время уровень помех в экспе-

риментальном зале возрастает в 10-100 раз /электросварочные работы, работа мостового крана/, но уровень флюктуаций стабилизированного магнитного поля в установке не превышает 10 нТ /с использованием подмагничивания экрана переменным током силой до 10 А при максимальном уровне помех/.

Полученные результаты удовлетворяют требованиям при проведении измерений ЭДМ нейтрона на реакторах с потоком тепловых нейтронов до  $10^{14}$  см<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>.

Авторы выражают глубокую благодарность А.Н.Козлову за непосредственную помощь при выполнении настоящей работы и любезно предоставленные отдельные элементы магнитометра.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Шапиро Ф.Л. УФН, 1968, 95, с. 145.
2. Таран Ю.В. ОИЯИ, РЗ-7147, РЗ-7149, Дубна, 1973.
3. Ананьев В.Д. и др. ПТЭ, 1977, 5, с. 17.
4. Таран Ю.В. ОИЯИ, Б1-3-7151, 1973; Б1-13-8441, Дубна, 1974.
5. Таран Ю.В. ОИЯИ, РЗ-8442, Дубна, 1974.
6. Алексеев Н.А. и др. ОИЯИ, Р13-9221, Дубна, 1975.
7. Таран Ю.В. ОИЯИ, Р13-9275, Дубна, 1975.
8. Никитенко Ю.В., Таран Ю.В. ОИЯИ, Р13-10068, Дубна, 1976.
9. Таран Ю.В. ОИЯИ, РЗ-7377, Дубна, 1973.
10. Померанцев Н.М., Рыжков В.М., Скромный Г.В. Физические основы квантовой магнитометрии. "Наука", М., 1972.
11. Пивоваров С.П. В сб.: "Приборы и методы измерения магнитных полей". ИЛИМ, Фрунзе, 1968, с. 106.
12. Новиков Л.Н. В сб.: "Географическая аппаратура", Недра, 1971, 47, с. 23.
13. Александров Е.Б., Бонч-Бруевич А.М., Ходовой В.А. Оптика и спектроскопия, 1967, 23, с. 282.
14. Скрынников Р.Г., Наумов А.П. В сб.: "Географическая аппаратура", Недра, 1972, 49, с. 19.
15. Чидсон Ю.С. ПТЭ, 1973, 4, с. 129.
16. Лапшин В., Крылов В., Зайцев В. Радио, 1975, 12, с. 51.
17. Гейлер Л.Б. Введение в теорию автоматического регулирования, "Наука и техника", Минск, 1967.

Рукопись поступила в издательский отдел  
23 ноября 1978 года.