

Л-966

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

13 - 12129

ЛЮТЫЙ

Игорь Николаевич

СТАБИЛИЗАЦИЯ ТОПОГРАФИИ
НЕОДНОРОДНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ
МЕТОДОМ НУТАЦИИ

Специальность 01.04.16 - физика атомного ядра
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Дубна 1978

Работа выполнена в Институте ядерных исследований
АН УССР, г. Киев

Научный руководитель -- доктор физико-математических наук
ФЕОКИСТОВ А.И.

Официальные оппоненты: доктор технических наук профессор
БЕРНОВОЙ А.И.,
кандидат физико-математических наук
ЧУМИН В.Г.

Ведущее научно-исследовательское учреждение --
НИИФ Ленинградского ордена Ленина
государственного университета
им. А.А.Жданова

Защита диссертации состоится " " 1979г. в " "
часов на заседании специализированного Ученого Совета
Д-047.01.03 при Лаборатории ядерных проблем Объединенного
института ядерных исследований (г. Дубна).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ

Автореферат разослан " " 1979 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ СОВЕТА
кандидат физ.-мат.наук

БАТУСОВ Ю.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. В ряде физических исследований требуется создание неоднородных магнитных полей определенной топографии и стабилизация их напряженности во всем объеме рабочего пространства в течение длительного времени. Стабилизация поля только в одной точке в некоторых случаях оказывается недостаточной, так как не устраняет изменения топографии поля в результате действия остаточного магнетизма, изменения температуры, нестабильности питания шиммов и т.д. Кроме того, топография поля изменяется при его перестройке. В подобных случаях требуется стабилизация поля в нескольких точках.

В частности, такая задача возникает в β -спектрометрах типа $\pi\sqrt{2}$ высокого разрешения, магнитное поле которых до настоящего времени стабилизировалось преимущественно в одной точке (за исключением спектрометра, описанного О.Д.Ковригиным и Г.Д.Латышевым), а высокая стабильность топографии достигалась только за счет безжелезных конструкций таких спектрометров, представляющих уникальные дорогостоящие приборы. Поэтому получение в железном спектрометре параметров поля (топографии и стабильности), позволяющих хотя бы приблизить разрешение к предельному разрешению безжелезного спектрометра (0,012 + 0,018% на импульсу), представляет известный научный интерес и может дать существенный экономический эффект, т.к. стоимость железного β -спектрометра $\pi\sqrt{2}$ значительно ниже стоимости безжелезного.

Неоднородность и малая напряженность поля ограничивают в β -спектрометрах $\pi\sqrt{2}$ применение обычных методов ЯМР-стабилизации поля. Наиболее пригодным в таких полях является метод нутации суммарного вектора ядерной намагниченности в проточной жидкости. Однако обычная методика привязки поля к одному из нулей линии нутации неприменима, если требуется фиксированное отношение полей в нескольких точках (в том числе, при перестройке поля), высокая стабильность и абсо-

лутные измерения поля. Поэтому весьма перспективным для нутационных датчиков является общеизвестный модуляционный метод привязки поля к резонансной линии, при условии разработки конструкции датчика с высокой симметрией линии нутации.

Целью работ являлось обоснование возможности применения модуляционного метода для стабилизации магнитного поля в нескольких точках с помощью нутационных датчиков и создание соответствующей аппаратуры для формирования и стабилизации топографии поля в железном β -спектрометре $\pi\sqrt{2}$.

Научная новизна. Впервые осуществлен модуляционный метод стабилизации неоднородного магнитного поля с помощью 2-х и 3-х нутационных датчиков. Теоретически и экспериментально обоснована возможность получения достаточно но симметричной линии нутации, пригодной для такого метода стабилизации. Разработана методика экспериментального исследования малой величины асимметрии линии нутации и найден способ ее уменьшения.

Предложен метод оптимизации некоторых параметров нутационных датчиков и гидросистемы.

На основе экспериментального исследования корректирующих полей в железном β -спектрометре $\pi\sqrt{2}$ предложен метод их взаимной развязки в стабилизируемых точках в статическом и динамическом режимах. Экспериментально показано, что процесс установления топографии всего поля в целом является достаточно длительным (десятки секунд).

Практическая ценность работы. Разработанный метод стабилизации топографии поля и применение датчиков усовершенствованной конструкции с симметричной линией нутации позволяют реализовать высокую стабильность поля, свойственную модуляционному методу стабилизации, в магнитных системах, не требующих быстрогодействия.

Создана аппаратура, обеспечивающая длительную эффективную стабильность поля $\sim 10^{-5}$ при воспроизводимости топографии $\sim 10^{-4}$. Применение такой аппаратуры в железном β -спектрометре $\pi\sqrt{2}$ позволяет повысить его разрешение до $0,020 \pm 0,025\%$ по импульсу, что близко к разрешению безжелезных спектрометров такого типа.

На защиту выносятся:

- практическое обоснование возможности применения модуляционного метода для стабилизации неоднородного магнитного поля с помощью 3-х нутационных датчиков; одноканальный вариант включения датчиков;
- результаты теоретического и экспериментального исследования асимметрии линии нутации и других параметров датчиков; метод экспериментального исследования асимметрии и способ ее уменьшения в датчике с поперечным градиентом;
- метод независимой оптимизации параметров нутационных датчиков и транспортирующего участка системы с проточной жидкостью;
- усовершенствование конструкции нутационного датчика с поперечным градиентом;
- результаты экспериментального исследования корректирующих полей в железном β -спектрометре $\pi\sqrt{2}$ и метод их взаимной развязки в статическом и динамическом режимах;
- разработанная аппаратура стабилизации неоднородного магнитного поля в 8-х точках и результаты ее применения в железном β -спектрометре $\pi\sqrt{2}$;
- вывод об эффективности стабилизации поля в 3-х точках, следующий из сравнения параметров поля при одной, двух и трех точках стабилизации;
- метод стабилизации средней частоты модулируемого опорного генератора.

Объем работы. Диссертация изложена на 192 стр., в том числе 145 стр. основного машинописного текста, 33 стр. рисунков и 3 таблицы, и состоит из введения, 5 глав, выводов и списка литературы, включающего 105 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении, кроме изложенной выше общей характеристики работы, отмечена основная особенность применения модуляционного метода в нутационных датчиках, затрудняющая его практическое использование, — низкое значение модулирующей частоты (~ 1 Гц). Это приводит к некоторой временной задержке сигнала ошибки, однако такая задержка не снижает существенно быстродействия системы стабилизации, т.к. нутационной системе с проточной жидкостью, в принципе, уже присуща задержка сигнала (~ 1 с и более) при протекании жидкости от датчика к анализатору и, следовательно, невысокое быстродействие. Для железного β -спектрометра $\pi\sqrt{2}$ низкое быстродействие системы стабилизации поля не является недостатком, т.к. в массивном магните спектрометра установление поля и его топографии, если речь идет об установлении с точностью 10^{-4} – 10^{-5} , продолжается длительное время, по меньшей мере десятки секунд. В отдельных точках скорость установления корректирующих полей можно увеличить (что и было выполнено для двух точек, где установлены датчики), однако в остальных точках закон установления корректирующих полей определяется суммой кривых, подобных приведенным на рис. I.1а и I.3а. Поэтому быстрое принудительное установление поля в двух или трех стабилизируемых точках не имеет смысла, т.к. вследствие переходных процессов оно не приведет к столь же быстрому установлению поля в остальных точках рабочего пространства магнита.

В I-й главе рассмотрены параметры некоторых типов нутационных датчиков. Т.к. модуляционный метод имеет смысл только в случае симметричной линии, то рассмотрение выполнено, главным образом, с целью оценки симметрии и ширины линии нутации.

В случае однородного измеряемого поля H ($\frac{\Delta H}{h} \ll 1$, где ΔH — неоднородность поля H в пределах датчика, h — половина напряженности осциллирующего поля частоты ω) линия нутации описывается выражениями, в которые ω и H входят только в виде $|\omega - \gamma H|$ (γ — гиромангнитное отношение ядра), как в случае $h = \text{const}$, так и при изменяющейся величине h вдоль пути движения жидкости, поэтому симметрия линии нутации здесь очевидна.

В случае поперечного градиента H для простейшего типа течения с неперемешивающимися слоями жидкости условия симметрии линии нутации могут быть получены в виде

$$|h(y)| = |h(-y)|; \tau(y) = \tau(-y); P(y) = P(-y); \text{grad} H(y) = \text{grad} H(-y); \quad (1)$$

где y — координата вдоль градиента H , $P(y)$ — весовой коэффициент. Для постоянных величин h , τ , P и $\text{grad} H$ выполнен расчет формы линии при нескольких значениях параметра $\beta = \gamma \Delta H \tau$ (τ — время взаимодействия ядер с осциллирующим полем) на основании известной зависимости $M_z(\beta)$, заданной графически. Симметрия линии нутации сохраняется независимо от вида функции $M_z(\beta)$ или погрешности ее графического задания.

В случае продольного градиента H , если выполняются условия быстрого адиабатического прохождения через резонанс ($\frac{\Delta H}{h} \gg 1$), выражение для M_z , полученное А.И. Жерновым, имеет вид

$$\frac{M_z}{M_0} = 2e^{-\frac{\gamma}{2} \frac{h^2}{dH/dt}} - 1, \quad (2)$$

где M_0 — намагниченность жидкости на входе датчика. Из (2) следует,

что при $gradH = const$ и постоянной скорости течения форма линии нутации зависит от закона изменения h вдоль градиента H , следовательно, симметрия линии может быть легко получена и в этом случае.

В главе рассмотрены также условия максимальной чувствительности, ширина и амплитуда линии нутации и другие параметры некоторых конструкций датчиков с продольным градиентом в режиме $\frac{\Delta H}{h} \gg 1$. Проведено сравнение параметров датчика с короткой катушкой и датчика с нулевым осциллирующим полем в центре.

При оптимальных параметрах датчиков обычно не выполняется ни одно из условий $\frac{\Delta H}{h} \ll 1$ или $\frac{\Delta H}{h} \gg 1$, поэтому расчет оптимальных параметров затруднен. Более простой способ оценки ширины линии нутации на полувывоте для i -го экстремума дается известной полуэмпирической формулой

$$\Delta f_{1/2} = K_1 \frac{1}{\tau} + K_2 \frac{\gamma}{2\pi} \Delta H, \quad (3)$$

пригодной для обоих градиентов и в широком диапазоне изменения δ . Коэффициенты K_1 и K_2 определяются экспериментально.

Из одвигов частоты резонанса в нутационных датчиках некоторую опасность представляет сдвиг Блоха-Зигерта от ближайшей гармоники опорной частоты. Оценка такого сдвига и вносимой им асимметрии линии от наиболее близкой 10 -й гармоники в 3 -м датчика, работающем на 11 -й гармонике, дает в рабочем диапазоне полей пренебрежимо малую величину.

Во 2-й главе предложен метод независимого расчета оптимальных параметров датчиков и транспортирующего участка гидросистемы.

В модуляционном методе стабилизации магнитного поля желательно уменьшение асимметрии линии нутации до уровня, соизмеримого с погрешностью привязки поля к такой линии, что, как минимум, на два

порядка меньше ширины самой линии. В литературе нет оценки столь малой величины асимметрии. Полученные в гл. I для различных типов датчиков выводы о полной симметрии линии нутации в случае выполнения ряда идеализированных условий практически позволяют считать такую линию симметричной лишь в первом приближении, так как в реальных конструкциях датчиков некоторые из этих условий выполняются и могут быть учтены лишь приближенно. Следовательно, полученные выводы затруднительно использовать для оценки симметрии линии нутации реальных датчиков с требуемой точностью. Поэтому при выборе конструкции датчика руководствовались условием симметрии конструкции, следующим из (I), а при расчете — условием минимизации ширины линии нутации (аналогично ряду работ, реферируемых в начале главы), полагая амплитуду и форму линии практически постоянными, что подтверждено экспериментально в датчиках применяемой конструкции. В рассмотренных работах оптимизация выполняется только для одного параметра (например, одного из размеров датчика) при заданных остальных параметрах, в том числе и расходе жидкости q . Представляет интерес одновременное определение оптимальных величин всех размеров датчика и q , независимо от других параметров системы с проточной жидкостью. В предложенном методе решения такой задачи выражение (B), записанное для средней ширины линии нутации в диапазоне частот от f_1 до f_2 , дополняется условием турбулентности течения. В случае прямоугольного сечения канала при поперечном градиенте оптимальный размер канала вдоль градиента α_0 , соответствующая ему минимальная средняя ширина линии нутации $\left(\frac{\Delta f_{1/2}}{f}\right)_{min}$ и минимально допустимый расход q_{min} получены в виде:

$$\alpha_0 = \left(\frac{2200 \nu}{\beta} \frac{c n f_2}{f_2 - f_1} \frac{K_1}{K_2} \frac{H}{grad H} \right)^{1/3}; \quad (4)$$

$$\left(\frac{\Delta f_{\text{из}}}{f}\right)_{\min} = \frac{3}{2} K_2 \frac{\text{grad} H}{H} \alpha_0; \quad (5)$$

$$q_{\min} = 1100 \alpha \nu \alpha_0; \quad (6)$$

где ν - кинематическая вязкость жидкости, α , β - отношение протяженности канала поперек и вдоль течения к размеру α (определяются конфигурацией стабилизируемого поля).

Задача решена также для случая продольного градиента при прямоугольном и круглом сечениях канала. Сопоставление результатов расчета для поля β -спектрометра показывает, что в таком поле лучшими параметрами обладает датчик с поперечным градиентом. Показано, что в таком датчике вместо прямоугольных радиочастотных катушек допустимо применение катушек с круглым сечением.

Предложенный метод практического расчета оптимального сечения S транспортирующего участка в реальной гидросистеме учитывает гидродинамическую взаимосвязь между S и q в турбулентном режиме, соответствующую максимальному рабочему давлению на входе гидросистемы. Применение оптимального сечения позволяет несколько повысить M_z по сравнению с оптимальным расходом. С целью упрощения исходных аналитических выражений и исключения неизвестных параметров, определение которых затруднено, (эффективной шероховатости труб, зависящей от их засорения и др.) расчет сводится к уточнению экспериментально известных значений расхода q_0 и сечения S_0 , достаточно близких к оптимальным и соответствующих реальным величинам остальных параметров системы. Построены номограммы, удобные для практического расчета.

Исходные величины для такого расчета, пропорциональные q_0 и S_0 , измеряются экспериментально по изменению сигнала анализатора, что исключает необходимость геометрических измерений в поляризаторе и транспортирующем участке сложной конфигурации.

Выражения (4) - (6) справедливы при условии $\alpha \gg 1$, в этом случае α_0 не зависит от α . Это позволяет путем выбора α получать совпадение оптимальных расходов в нутационном датчике и транспортирующем участке. При других α оптимальные величины обоих расходов можно выбрать достаточно близкими в связи со слабой зависимостью $\left(\frac{\Delta f_{\text{из}}}{f}\right)_{\min}$ от α и $M_{z \max}$ от q .

В 3-й главе рассмотрены вопросы практической корректировки радиального распределения поля в магните β -спектрометра $\pi\sqrt{2}$ с помощью II пар концентричных шиммов конструкции А.В.Золотавина и Е.П.Григорьева. Кроме применяемого в таких спектрометрах линейного корректирующего поля применено дополнительное поле с нелинейной зависимостью $\Delta H(\rho)$ (поле шимма № 2), управляющее радиальным распределением $H(\rho)$ в промежутке между I-м и 2-м стабилизирующими датчиками.

Для устранения трудоемкого процесса корректировки поля по методу последовательных приближений применена взаимная развязка корректирующих полей путем компенсации линейного корректирующего поля в точке расположения I-го датчика и поля 2-го шимма - в точках расположения I-го и 2-го датчиков. Формирование корректирующих полей представлено на рис. I в виде семейства их радиальных и временных зависимостей и соответствующих им схем включения корректирующих обмоток.

В статическом режиме радиальные зависимости $\Delta H(\rho)$ могут быть представлены как сумма соответствующих экспериментальных кривых для шиммов $L_1 \div L_{II}$ (кривые I + II, рис. I.2а) и компенсационных обмоток L_{K1} и L_{K2} (кривая 0). Линейное корректирующее поле (кривая с, рис. I.2б) создается экспериментально подобранной группой, состоящей из шиммов № 4, 5, 9, 10, II, соединенных последовательно (кривая α), и компенсационной обмот-

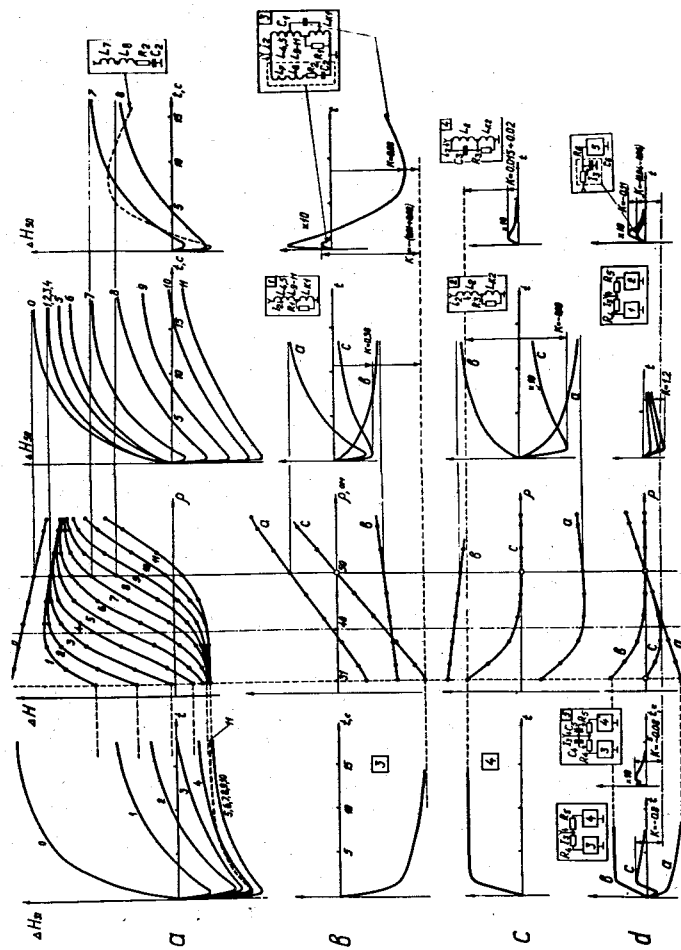


Рис. 1. Временные и радиальные зависимости корректирующих полей β -сплетрометра $\pi\sqrt{2}$.

кой L_{K1} , шунтированной резистором R_1 (кривая β). Включение всех II пар шиммов в используемом магните не обеспечивает достаточной линейности. Нелинейное корректирующее поле получено суммированием поля 2-го шимма и компенсационной обмотки L_{K2} (рис. 1.2 c) с линейным корректирующим полем (рис. 1.2 d). Взаимная развязка корректирующих полей в статическом режиме легко достигается подбором резисторов $R_1, R_3 \div R_5$.

Получение развязки в динамическом режиме представлено на рис. 1.3 и 1.4 (для $\rho = 50 \text{ см}$) и на рис. 1.1 (для $\rho = 31 \text{ см}$), где изображены кривые установления $\Delta H(t)$ корректирующих полей, радиальные зависимости которых представлены на рис. 1.2. Применение компенсирующих элементов, изображенных на схемах рис. 1.4 и 1.1, позволило уменьшить выбросы результирующих кривых до значений $0,08 + 0,01$ от величины соответствующих корректирующих полей, что соизмеримо с их разбросом в рабочем диапазоне.

Кривые установления корректирующих полей для различных шиммов (рис. 1.1 a и 1.3 a) существенно отличаются друг от друга, причем у некоторых из них поле в процессе установления меняет полярность. Поэтому следует подчеркнуть, что полученная динамическая компенсация имеет место только для двух стабилизируемых точек, во всех остальных точках корректирующее поле устанавливается медленно.

В 4-й главе дано полное описание аппаратуры стабилизации магнитного поля в 3-х точках и отмечены некоторые особенности первоначального варианта с двумя стабилизирующими датчиками.

В связи с невысокими требованиями к быстродействию система построена по одноканальному варианту с поочередной работой датчиков, а период модуляции T выбран достаточно большим (1,5 с). Применение одноканального варианта с одним общим поляризатором,

гидросистемой, анализатором, регистрирующим и исполнительным трактом и общими органами контроля дает существенную экономию аппаратуры по сравнению с 3-канальным вариантом.

Первый датчик установлен на равновесной орбите спектрометра. Радиальные координаты 2-го и 3-го датчиков выбраны таким образом, чтобы их питание осуществлялось 5-й и 6-й гармониками опорной частоты и II-й гармоникой частоты $\frac{f_{on}}{2}$.

Вода, прошедшая поляризатор 4 (рис.2), последовательно протекает через нутационные датчики 2,3,1 и поступает в анализатор 5 (радиоспектрометрический тракт, регистрирующий M_2). Последовательность работы всех элементов задается коммутатором 8, управляющие импульсы которого изображены на эпюрах $k \div r$ рис.3. Фазовые соотношения импульсов $k \div r$ могут регулироваться. Импульсы q управляют частотным модулятором 9, импульсы n, o, p подключают датчики к соответствующим умножителям 6. Частота опорного генератора 7 f_{on} и радиочастотных импульсов, питающих датчики, изменяется по закону a, b, c, d .

На движущуюся струю жидкости радиочастотные импульсы 2-го (или 3-го) датчиков 2 - 2' (3 - 3') воздействуют в промежутках между импульсами I - I' I-го датчика (рис. 3 f). Очередность достигается регулировкой фазовых соотношений импульсов n, o, p . Зависимость напряжения на выходе анализатора от частот, питающих датчики, имеет вид 3-х линий нутации (рис. 3 e). Напряжение, поступающее на синхронные детекторы 10, имеет вид импульсов I - I', 2 - 2', 3 - 3' (g).

Сигнал ошибки I-го датчика выделяется одним из 3-х синхронных детекторов в виде импульса h , амплитуда и полярность которого зависит от асимметрии линии нутации I-го датчика относительно

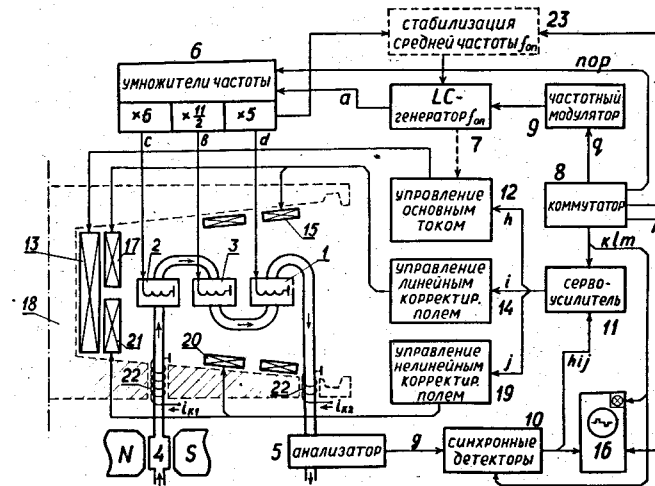


Рис.2. Структурная схема системы стабилизации магнитного поля в 3-х точках. 1-3-нутационные датчики; 4-поляризатор; 13-основная обмотка магнита; 15-шиммы поворота; 17,21-компенсационные обмотки; 18-магнит; 20-шимм №2; 22-подмагничивающие катушки.

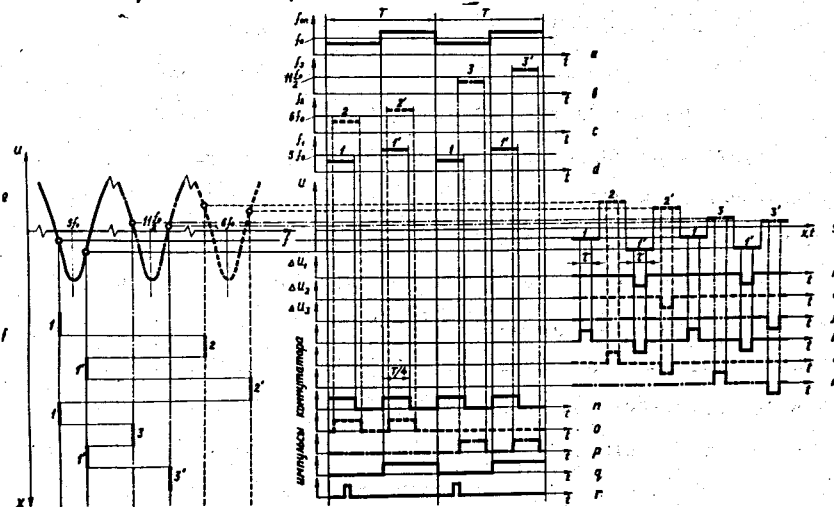


Рис.3. Эпюры напряжений к рис.2. Пунктирные линии относятся ко 2-й точке стабилизации, штрихпунктирные - к 3-й. Буквенные обозначения рис. 1 и 2 совпадают.

питающих его частот. По опорному каналу этот синхронный детектор управляется импульсами K , длительность которых $\tau < \frac{T}{4}$, таким образом, процессы установления сигнала, сопровождающие переключения датчиков, не детектируются. Аналогично, сигналы ошибок 2-го (3-го) датчиков выделяются в виде импульсов $i(j)$ при опорных импульсах синхронных детекторов вида $e(m)$. Сигналы ошибки, следующие в разное время, усиливаются одним общим сервоусилителем II, выход которого отрицательными опорными импульсами k, e, m поочередно подключается к реверсивным двигателям одного из исполнительных устройств I2, I4 или I9.

Для облегчения определения соответствия между импульсом на экране осциллографа I3 и номером датчика применена трехцветная подсветка экрана импульсами k, e, m . Подмагничивающие катушки 22 установлены в местах возможного отрыва вектора \vec{M} от направления внешнего поля.

При длительной работе аппаратуры возможен медленный уход частоты опорного LC-генератора. Замена LC-генератора кварцованным или стабилизация его частоты обычными методами затруднена, т.к. опорная частота модулирована по прямоугольному закону, а глубина модуляции и сама частота требуют плавной перестройки. В разработанном канале стабилизации средней частоты f_{on} (28, рис. 2) напряжение, пропорциональное разности частот кварцевого генератора ГЗ-49 и 5 n -й гармоники f_{on} , используется для получения сигнала ошибки методом, рассмотренным выше для нутационных датчиков, что исключает погрешность от нелинейности или нестабильности характеристики преобразователя частота-напряжение. Отклонение средней частоты при длительной работе не превышает $\pm 2 \cdot 10^{-6}$ в диапазоне 10 + 150 кГц. Вследствие симметрии линии нутации отпадает необходимость стабилизировать глубину модуляции.

В 5-й главе приведены результаты экспериментального исследования параметров стабилизируемого поля и нутационных датчиков и кратко описана вспомогательная аппаратура, разработанная для таких исследований.

Аппаратура для исследования датчиков позволяет записывать на 2-координатный самописец зависимости $M_z(f)$, $M_z(h)$ и смещение поля, стабилизируемого датчиком в модуляционном режиме. В качестве примера на рис. 4 приведены линии нутации, полученные с помощью такой аппаратуры.

Для измерения топографии магнитного поля использован перемещаемый датчик той же конструкции, что и стабилизирующие. Погрешность измерения топографии определяется воспроизводимостью положения датчика и составляет $\sim 10^{-4}$ при использовании линейки координатометра и $\sim 10^{-5}$ при установке датчика в одной из 6 фиксированных точек.

Примененные нутационные датчики с поперечным градиентом и прямоугольным сечением канала аналогичны описанным О.В. Стаховым. Конструктивное усовершенствование таких датчиков заключалось в следующем.

1. С целью улучшения соосности, симметрии и взаимозаменяемости катушек применены катушки цилиндрической формы. Конструкция позволяет выполнять исследования, связанные с заменой катушек, при сохранении одного и того же рабочего канала.

2. Разработана технология изготовления датчиков, предусматривающая однозначную фиксацию рабочего канала относительно внешних точек крепления, что позволяет получить воспроизводимое положение датчика по полю $\sim 10^{-4}$ при его замене и $\sim 10^{-5}$ при повторной установке датчика.

Выполнено экспериментальное исследование асимметрии линии нутации таких датчиков. Ввиду малой величины асимметрии запись самой

линии нутации для такого исследования связана с дополнительной погрешностью, поэтому разработан метод непосредственной записи смещения поля $\delta H(h)$, вызванного асимметрией. В режиме записи $\delta H(h)$ аппаратура для исследования датчиков представляет собой локальный модуляционный стабилизатор магнитного поля упрощенной конструкции, корректирующий поле в области рабочего канала исследуемого датчика с помощью небольшой катушки, ток в которой записывается самописцем как мера отклонения поля.

В случае плоских радиочастотных катушек максимальная зарегистрированная величина δH достигает $1,5 \cdot 10^{-4}$. Причиной асимметрии в этом случае является поле рассеяния плоских радиочастотных катушек. Применение тороидальных или удлиненных катушек с меньшим рассеянием уменьшает δH до уровня, соизмеримого с погрешностью привязки поля к линии нутации. Практически наиболее целесообразно использование однослойных цилиндрических катушек, ввиду громоздкости тороидальных.

Таким образом, экспериментально подтверждена возможность получения достаточно симметричной линии нутации и, следовательно, целесообразность применения модуляционного метода привязки поля к такой линии.

Сравнение расчетных зависимостей $\Delta f_{1/2}(\epsilon)$, выполненных по (3) и в соответствии с моделью неперемешивающихся слоев жидкости, показывает, что лучшее согласие с экспериментом дает первый способ расчета. Существенного уменьшения амплитуды линии нутации и уплощения ее вершины при больших ϵ , ожидаемого согласно расчету для датчика с неперемешивающимися слоями жидкости, также не наблюдается. Это подтверждает целесообразность расчета датчиков в соответствии с (3).

Исследован эффект увеличения амплитуды и ширины линии нутации в датчике с поперечным градиентом при введении продольной неоднородности внешнего поля (наклон датчика). Получено экспериментальное

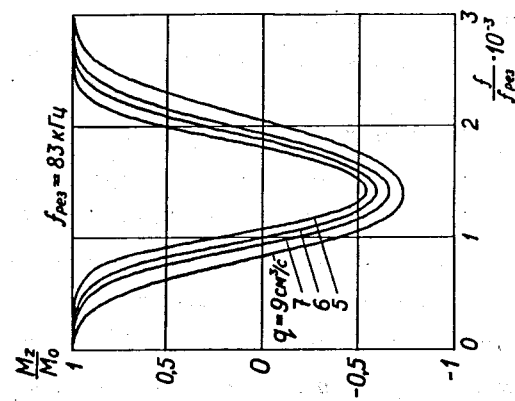


Рис. 4.

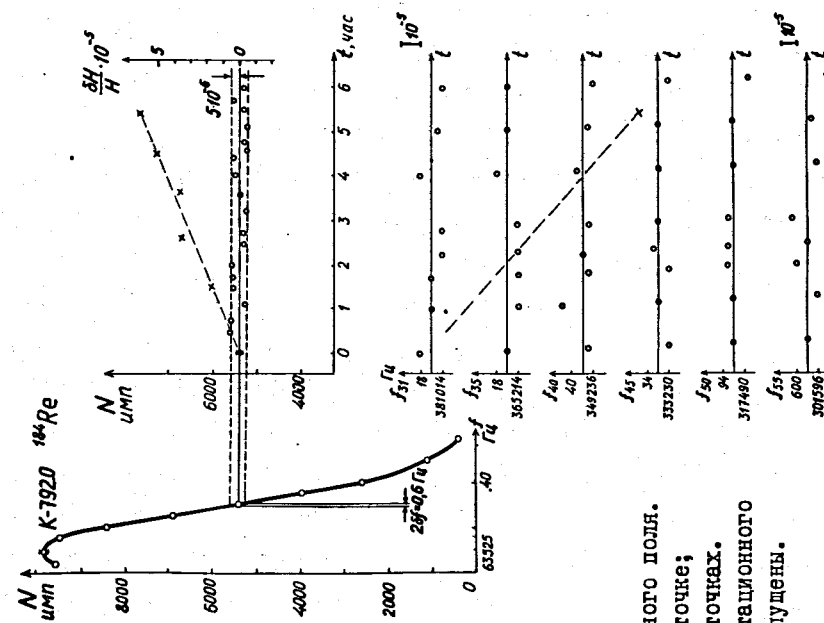


Рис. 5.

Контроль стабильности магнитного поля.
 X — стабилизация поля в 1-й точке;
 O — стабилизация поля в 3-х точках.
 Промежуточные точки X для нутационного измерителя магнитного поля опущены.

подтверждение расчетной величины оптимального угла наклона и увеличения эффекта с ростом β .

Экспериментальное исследование стабильности поля и его топографии осуществлялось двумя способами: по наиболее узким и интенсивным линиям β -спектров и по нутационному измерителю магнитного поля, работающему независимо от системы стабилизации. Первый способ позволяет оценить некоторую эффективную стабильность поля во всем рабочем пространстве спектрометра, представляющую основной интерес и недоступную для измерения другими методами. Второй способ использован как вспомогательный для контроля поля в отдельных точках доступной для измерений области магнита.

Стабильность неперестраиваемого поля близка к величине $\pm 5 \cdot 10^{-6}$ в течение 5 часов и $\pm 1,1 \cdot 10^{-5}$ в течение суток. В качестве примера на рис. 5 представлены результаты измерения стабильности неперестраиваемого поля на склоне линии $K-792,0$ кэВ ^{184}Re при одновременном контроле поля в 6 точках нутационным измерителем. В случае применения только одного стабилизирующего датчика (экспериментальные точки \times) стабильность поля в пределах $\pm 5 \cdot 10^{-6}$ сохраняется не более 10 + 20 минут.

Нестабильность топографии при перестройке поля в пределах линии β -спектра ($\sim 10^{-8}$) при 3-х стабилизируемых точках не превышает 10^{-5} .

Экспериментальная оценка максимально возможного отклонения топографии поля в магните данной конструкции вследствие гистерезиса и перестройки поля, выполненная при 1-й, 2-х и 3-х стабилизируемых точках, также подтверждает эффективность 2-й и 3-й точек стабилизации.

Эффективная воспроизводимость топографии при повторном включении магнита в случае 3-х стабилизируемых точек составляет $\sim 10^{-4}$, что достаточно для работы спектрометра с высоким разрешением. При меньшем количестве стабилизируемых точек получение такой воспроизводимости, например, за счет использования градуировочных графиков для корректи-

рующих токов, было бы невозможно, т.к. погрешность таких графиков достигает нескольких процентов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Применен модуляционный метод для стабилизации магнитного поля с помощью трех нутационных датчиков, с учетом особенностей модуляции резонансных условий в таких датчиках.

2. Выполнено теоретическое и экспериментальное исследование асимметрии линии нутации и других параметров некоторых типов датчиков. Предложен метод экспериментального исследования малой величины асимметрии и найден способ ее уменьшения в датчике с поперечным градиентом до уровня 10^{-5} , что подтверждает целесообразность применения модуляционного метода стабилизации.

3. Предложен метод независимого расчета оптимальных параметров нутационных датчиков и транспортирующего участка системы с проточной жидкостью. Показано, что в случае датчика с плоским каналом можно получить совпадение оптимальных значений расхода жидкости в датчике и транспортирующем участке.

4. Усовершенствована конструкция нутационных датчиков с поперечным градиентом. Получена воспроизводимость положения рабочего канала при смене датчика $\sim 10^{-4}$ по полю.

5. Экспериментально исследованы радиальные и временные зависимости полей шиммов в β -спектрометре $\pi\sqrt{2}$. Подобраны группы корректирующих шиммов. Показано, что установление топографии всего поля в целом происходит медленно (десятки секунд).

6. Создана аппаратура стабилизации неоднородного поля в 2-х и 3-х точках с каналом формирования поля, предназначенным для работы с β -спектрометром $\pi\sqrt{2}$. Аппаратура позволяет получить радиальное распределение поля с погрешностью $\sim 10^{-4}$ и обеспечивает длительную эффективную стабильность поля на уровне 10^{-5} , что позволяет же-

лезному спектрометру работать с разрешением, близким к разрешению безжелезного (до 0,020% по импульсу). Аппаратура в различных вариантах эксплуатируется с действующим спектрометром в течение 9 лет.

7. Разработаны и применены в аппаратуре:

- метод стабилизации средней частоты модулируемого опорного генератора ;
- одноканальный вариант включения всех датчиков;
- метод взаимной развязки корректирующих полей в статическом и динамическом режимах, а также применена стабилизация резонансных условий в анализаторе.

8. Создана вспомогательная аппаратура для исследования явления нутации и измерения топографии магнитного поля.

9. По сравнению с 1-й стабилизируемой точкой введение 2-й точки стабилизации в случае неперестраиваемого поля увеличивает время эффективной стабильности поля на уровне 10^{-5} от 10-20 мин. до суток и более. Введение 3-й стабилизируемой точки уменьшает нестабильность топографии при перестройке и возмущениях поля (контролируемых и неконтролируемых), превышающих $2 \cdot 10^{-3}$, а также при исходном формировании поля.

Примененный метод стабилизации топографии неоднородного магнитного поля и разработанная аппаратура (с некоторой модификацией канала формирования поля) могут быть использованы для формирования и стабилизации медленно изменяющихся магнитных полей различной конфигурации в широком диапазоне напряженностей и градиентов. При необходимости количество стабилизируемых точек легко увеличить путем введения дополнительных переключений в коммутатор и увеличения количества каналов, питающих датчики.

Основные результаты работы докладывались на XX, XXIV и XXV Ежегодных совещаниях по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра (1970, 1974 и 1975 гг.), Всесоюзном совещании по физическим основам квантовой магнитометрии (1970 г.), научном семинаре отдела ядерной

спектроскопии НИИФ ЛГУ (1974 г.) и опубликованы в следующих работах:

1. Лютый И.Н., Гаврилюк В.И., Купряшкин В.Т., Латышев Г.Д., Маковецкий Ю.В., Феоктистов А. И. Стабилизация формы магнитного поля железного β -спектрометра $\pi\sqrt{2}$ с использованием нутационных датчиков.-Изв.АН СССР.Сер.физ., 1970, 34, №4, с.828-834.
2. Грыбинык А.И., Лютый И.Н. Стабилизация в трех точках магнитного поля бета-спектрометра $\pi\sqrt{2}$ высокого разрешения.-Сб.Прикладная ядерная спектроскопия. М., Атомиздат, 1975, вып.5, с.133-137.
3. Грыбинык А.И., Лютый И.Н. О корректировке формы магнитного поля в бета-спектрометре типа $\pi\sqrt{2}$. -Сб.Прикладная ядерная спектроскопия. М., Атомиздат, 1976, вып.6, с.267-274.
4. Дерягин I.A. Куц П.С., Лютый I.M., Тронько В.Д. Динамічна стабілізація магнітного поля.-Вісник КДУ, сер.фіз.-хім., 1966, № 4, с. 84 - 89.
5. Лютый И.Н., Гаврилюк В.И., Купряшкин В.Т., Латышев Г.Д., Маковецкий Ю.В., Феоктистов А.И. Устройство для стабилизации неоднородного магнитного поля. А.с. № 370515. Бюлл. ОИПОТЗ, 1973, №11, с.133.

Тезисы работ /I-3/ опубликованы в "Программе и тезисах докладов" XX, XXIV и XXV Совещаний по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра. Л., Наука, 1970, 1974 и 1975 г.г., с. 224, 476 и 442 .

Рукопись поступила в издательский отдел
26 декабря 1978 года.