

С 345e4
Л-312

2535/78
Лачинов, В. М.



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Б1-9-11494

ДЕПОНИРОВАННАЯ ПУБЛИКАЦИЯ

Дубна 1978

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Отдел новых методов ускорения

Б1-9-11494

В.М.Лачинов, В.А.Прейзендорф

МАГНИТОМЕТРИЧЕСКИЕ МЕТОДИКИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ХАРАКТЕРИСТИК ДИПОЛЬНЫХ МАГНИТОВ (обзор).

Рукопись проиндексирована
в ИЯИ им. Л.В.Келдыша
... 18 апр 1978 г.

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

г.Дубна, 1978 г.

ВВЕДЕНИЕ.

В настоящее время при создании новых и модернизации существующих ускорителей заряженных частиц на высокие энергии предполагается широко использовать сверхпроводящие магнитные системы. Эти магниты более экономичны и позволяют повысить магнитные поля до $(4\div 5)T$, что дает возможность существенно уменьшить размеры вновь создаваемых ускорителей или же повысить энергию ускоряемых частиц на существующих машинах. При создании магнитных систем, особенно сверхпроводящих, существует ряд проблем, касающихся магнитных измерений в них. Например, сверх-проводящие дипольные, отклоняющие магниты, создаваемые в ФНАЛе, Батавия, для "Даблера", как и магниты, проектируемые для УПК в ИФВЭ, характеризуются максимальными полями в центре $\sim 4,5T$ малыми размерами апертуры (диаметр до ~ 8 см.) и большой длиной до $(6\div 7)$ м. Требуемое количество этих магнитов для ускорителей достигает многих сотен штук, причем необходимы высочайшие точности их магнитных и геометрических параметров (до $\sim 10^{-5}$, \sim мкм).

Спецификой кольцевых ускорителей на высокие энергии является то, что длина отдельных дипольных или фокусирующих квадрупольных магнитов в ускорителях с разделенными функциями обычно мала в сравнении с длиной волны бетатронных колебаний. Это значит, что только интегральные значения индукции магнитного поля и ее производных вдоль траектории ускоряемых частиц существенны. Для ускорения вообще интересно наличие мультипольных линз, в которых присутствует только главная гармоника. Следовательно качество магнитов зависит от присутствия, кроме основной гармоники, более высоких или более низких компонент, которые возникают от различных погрешностей в конструкции магнитов и которые необходимо снижать до допустимых значений.

Для УНК, например, требования на основные параметры магнитных систем (диполи, квадруполь) сводятся к следующим.

1. Относительный разброс полей диполей - $5 \cdot 10^{-4}$.
2. Точность привязки оптической оси линз к геометрическому знаку по радиусу и вертикали - менее 0,1 мм.
3. Точность установки соседних линз по радиусу и вертикали - менее 0,05 мм.
4. Относительная нелинейная добавка к полю в апертуре диаметра 70 мм $\sim 10^{-4}$.
5. Точность определения наклона магнитной плоскости относительно геометрической - лучше 0,1 мрад.

В процессе создания подобных магнитных систем, а также при их серийном производстве возникает множество задач, связанных с измерениями магнитных полей, причем измерения эти весьма разнохарактерны. Во-первых, для дипольных, например, магнитов требуются измерения топографии магнитных полей в различных частях магнита (на оси, в медианной плоскости, в концевых областях) при различных уровнях возбуждения магнита (от уровня остаточных полей до максимальных) с максимально достижимыми точностями. Во-вторых, что особенно важно на конечных стадиях производства, требуется определение интегральных характеристик магнитов как топографического характера, так и с точки зрения содержания в распределении поля дополнительных гармонических составляющих. Причем для сверхпроводящих магнитов условия измерения в ряде задач усложнены подчас необходимостью проводить их при температурах жидкого гелия. Кроме того, поскольку основной режим работы дипольных магнитов в ускорителе - импульсный, возникает потребность измерений в них переменных полей.

Приведенный перечень магнитоизмерительных задач, а также опыт работы по созданию железных и сверх-проводящих магнитных систем ускорителей показывает необходимость применения различных измерительных методик. Как правило, используются различные магнитометрические средства на разных стадиях разработки магнитов при измерениях отдельных характеристик. При этом часто один параметр измеряется разными методиками с целью контроля правильности результата. Основными методиками, применяемыми в настоящее время при решении указанных задач, являются холловская и ЯМР методики, а также методика с использованием индукционных катушек. Все они в разной степени применимы для топографирования поля и измерения его гармонических составляющих.

Большее распространение при топографировании полей находят холловская и ЯМР методики. Топографирование поля требует большого объема измерений, достаточно сложной механической системы привода датчиков и точной регистрации их положения. В случае сверхпроводящих диполей для "Даблера" или УНК положение усложняется ввиду труднодоступности измеряемого объема и большого числа измеряемых магнитов. На начальном этапе разработки магнитов метод топографирования может оказаться полезным для детального исследования некоторых областей поля, например, на краях, на оси, с целью выбора наилучшей конструкции.

Однако особенно на стадии серийного производства станет необходимым более оперативный метод определения интегральных характеристик магнитов с помощью индукционных катушек. Эта методика особенно привлекательна тем, что достаточно быстро и просто определяет интегральный гармонический состав поля, хотя возможно применение и других методик для гармонического анализа.

Для создания УНК потребуется изготовление 1800 дипольных и 360 квадрупольных магнитов. Чтобы проверить их в разумные сроки и с минимальным количеством обслуживающего персонала, потребуется особое эффективное оборудование с возможно полной автоматизированной системой регистрации и обработки измеряемых данных.

Целью настоящей работы является проведение обзора современного состояния основных магнитоизмерительных методик и анализа их возможностей для более полного понимания проблем магнитных измерений на УНК и осуществления сотрудничества на основании этого между ОИИИ и ИФВЭ по вопросу создания конкретных систем измерения магнитных полей для УНК.

Ниже приведены некоторые теоретические предпосылки, относящиеся к данному вопросу, и подробно рассмотрены три основные методики измерения параметров полей магнитов (холловская, ЯМР и с помощью индукционных катушек), отмечены их главные преимущества, недостатки и примеры применений. В конце обзора по каждой методике сделана попытка оценить значимость их для указанных выше целей. В заключении представлены предложения по осуществлению конкретных электронных измерительных систем, которые, с т.зр. авторов, имеет смысл обсудить для составления программы сотрудничества с ИФВЭ по созданию магнитоизмерительной аппаратуры для УНК.

А. ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ДВУМЕРНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ ГАРМОНИЧЕСКИМИ РЯДАМИ

Двумерное магнитное поле в области, где плотность тока равна нулю, можно описать скалярным магнитным потенциалом $\varphi(z, \theta)$, удовлетворяющим уравнению Лапласа

$$\nabla^2 \varphi(z, \theta) = 0. \quad (1)$$

Общее решение уравнения (1) имеет вид:

$$\varphi(z, \theta) = \sum_{n=1}^{\infty} (A'_n \sin k_n \theta + B'_n \cos k_n \theta) (C_n z^{k_n} + D_n \bar{z}^{k_n}) + (E + F \cdot \theta)(G + H \ln z). \quad (2)$$

Так как потенциал однозначен по θ и периодичен с периодом 2π , то есть $\varphi(z, \theta) = \varphi(z, \theta + 2\pi)$, то $F = 0$ и $k_n = n$ — целые числа. Потенциал должен быть конечен при $z = 0$, поэтому $D_n = H = 0$

Для магнита, имеющего m полюсов $\varphi(z, \theta) = -\varphi(z, -\theta)$, поэтому $E \cdot \theta = B'_n = 0$. Кроме того, $\varphi(z, \theta) = \varphi(z, \frac{2\pi}{m} - \theta)$, следовательно $n = (2N - 1) \frac{m}{2}$, где $N = 1, 2, 3, \dots$. С учетом всех этих условий общее решение для потенциала m -^{юс}полюсного магнита будет иметь вид:

$$\varphi(z, \theta) = \sum_{N=1}^{\infty} A_{(2N-1)\frac{m}{2}} \left[\sin(2N-1)\frac{m}{2} \cdot \theta \right] \cdot z^{(2N-1)\frac{m}{2}}, \quad (3)$$

где $A_{(2N-1)\frac{m}{2}}$ — гармонические коэффициенты.

Тогда магнитная индукция \vec{B} равна

$$\vec{B} = -\mu_0 \vec{\nabla} \varphi(z, \theta) = -\mu_0 \sum_{n=1}^{\infty} n A_n z^{n-1} \left[(\sin n \theta) \vec{z}_0 + (\cos n \theta) \vec{\theta}_0 \right], \quad (4)$$

где \vec{z}_0 и $\vec{\theta}_0$ — орты в z и θ направлениях, а $n = 1, 3, 5, \dots$ при $m = 2$ (дипольный магнит), $n = 2, 6, 10, \dots$ при $m = 4$ (квадрупольный магнит), $n = 3, 9, 15, \dots$ при $m = 6$ (секступольный магнит) и т.д.

Коэффициенты A_n определяются из граничных условий на полюсах магнита. Если симметрия магнита выдержана абсолютно точно, то, как следует из (4), в нем могут присутствовать только гармоники, соответствующие его симметрии, так называемые "разрешенные" гармоники. В идеальном магните (с бесконечными полюсами) присутствует только первая (основная) "разрешенная" гармоника. Поскольку все реальные магниты имеют конечные размеры полюса, и их форма не всегда совпадает с идеальной, в них всегда имеются и высшие "разрешенные" гармоники. Если же симметрия магнита при его изготовлении выдержана не точно, то в нем будут присутствовать и "запрещенные" гармоники, не соответствующие его симметрии, хотя, как правило, их амплитуды заметно меньше амплитуд "разрешенных" гармоник. Причем, если фаза высших "разрешенных" гармоник, как правило, совпадают с фазой основной гармоники, поскольку они связаны с симметрией магнита, то "запрещенные" гармоники, связанные со случайными нарушениями симметрии могут иметь произвольные фазы относительно основной гармоники. Поэтому в общем случае компоненты магнитного поля будут иметь вид:

$$B_z = -\mu_0 \sum_{n=1,2,3,\dots} n A_n z^{n-1} \sin(n\theta + \alpha_n) = -\mu_0 \sum_{n=1}^{\infty} n z^{n-1} (a_n \sin n\theta + b_n \cos n\theta), \quad (5)$$

$$B_\theta = -\mu_0 \sum_{n=1,2,3,\dots} n A_n z^{n-1} \cos(n\theta + \alpha_n) = -\mu_0 \sum_{n=1}^{\infty} n z^{n-1} (a_n \cos n\theta - b_n \sin n\theta).$$

Или в декартовой системе координат x, y ?

$$B_x = -\mu_0 \sum_{n=1}^{\infty} n z^{n-1} [a_n \sin(n-1)\theta + b_n \cos(n-1)\theta], \quad (6)$$

$$B_y = -\mu_0 \sum_{n=1}^{\infty} n z^{n-1} [a_n \cos(n-1)\theta - b_n \sin(n-1)\theta].$$

Выясним физический смысл коэффициентов a_n и b_n . Рассмотрим выражения (6) при $\theta = 0$. Тогда

$$B_y(\theta=0) = -\mu_0 \sum_n n a_n z^{n-1}, \quad B_x(\theta=0) = -\mu_0 \sum_n n b_n z^{n-1}. \quad (7)$$

Последовательно находя производные по x выражений (7) в точке $x=0$, получим

$$a_n = \frac{1}{n!} \left. \frac{\partial^{n-1} B_y}{\partial x^{n-1}} \right|_{z=0}, \quad b_n = \frac{1}{n!} \left. \frac{\partial^{n-1} B_x}{\partial x^{n-1}} \right|_{z=0}. \quad (8)$$

Таким образом мы видим, что гармонические коэффициенты магнитного поля выражаются через производные компонент этого поля в центре магнита, т.е.

$$B_x = -\mu_0 \sum_n \frac{n z^{n-1}}{n!} \left[\left. \frac{\partial^{n-1} B_y}{\partial x^{n-1}} \right|_{z=0} \sin(n-1)\theta + \left. \frac{\partial^{n-1} B_x}{\partial x^{n-1}} \right|_{z=0} \cos(n-1)\theta \right], \quad (9)$$
$$B_y = -\mu_0 \sum_n \frac{n z^{n-1}}{n!} \left[\left. \frac{\partial^{n-1} B_x}{\partial x^{n-1}} \right|_{z=0} \cos(n-1)\theta - \left. \frac{\partial^{n-1} B_y}{\partial x^{n-1}} \right|_{z=0} \sin(n-1)\theta \right].$$

Зная гармонические коэффициенты, можно по формулам (5), (6)

вычислить магнитное поле в любой точке апертуры магнита. Существует

ряд метод^{ов} измерения гармонических коэффициентов магнитного поля, которые будут рассмотрены ниже.

Б. МАГНИТОМЕТРЫ С ПОМОЩЬЮ ИНДУКЦИОННЫХ КАТУШЕК (ИК).

1. Введение.

Методика измерения магнитных полей с использованием индукционных катушек (ИК) в качестве датчиков давно и широко используется в практике магнитных измерений^{/26, /}. Согласно закона Фарадея при изменении магнитного потока Φ , пронизывающего эффективную площадь ($N_{\text{вит}} \cdot S_{\text{ср}}$) ИК, в ней индуцируется напряжение U , равное

$$U = N_{\text{вит}} \cdot S_{\text{ср}} \cdot \frac{d\Phi}{dt} . \quad (I)$$

На основе этой зависимости можно осуществить следующие методы измерения действительного значения стационарного магнитного поля.

1. Метод поворотной ИК, когда производится поворот катушки на κ -л. угол относительно оси, лежащей в плоскости ИК. Интеграл ее выходного напряжения пропорционален изменению измеряемого магнитного потока через ИК. Выбирая направление оси вращения и начальный угол возможно измерить любую компоненту поля.

2. Метод сдвигающейся ИК, когда происходит перемещение ИК от одной точки в пространстве к другой без вращения. Здесь интеграл выходного напряжения ИК измеряет разницу между значениями компонент поля, параллельных оси катушки, в двух положениях ИК.

3. Метод постоянно вращающейся или вибрирующей ИК, в котором движение ИК происходит относительно оси в плоскости катушки. Выходной сигнал ИК регистрируется фазочувствительным детектором.

Наибольшее распространение нашли различные варианты 1 и 2 метода с использованием интеграторов, которые и рассматриваются ниже. Реализация этих методик в конкретных магнитометрах характеризуется

большим разнообразием конструкций ИК по размеру, назначению и чувствительности. Также многообразна применяемая с ИК электронная аппаратура. Достигнуты точности относительных измерений $\sim 10^{-4}$, а в отдельных случаях до 10^{-5} .

В случае динамических магнитных полей методика измерения с ИК упрощается, так как не нужно изменять пространственное положение ИК.

Особо широкое приложение ИК нашли в магнитоизмерительных приборах для магнитных систем в ускорительной технике, где наиболее четко проявились следующие преимущества этой методики.

1. Линейность преобразования измерителей с ИК.
2. Широкий диапазон значений измеряемых полей.
3. Возможность измерения точечных и интегральных пространственных и временных характеристик полей.
4. Высокая достижимая относительная точность измерения полей.
5. Возможность непосредственного определения гармонических составляющих распределений полей.
6. Широкий частотный диапазон измеряемых полей.
7. Конструктивная простота датчика с ИК.
8. Относительно низкая термочувствительность датчиков с ИК.

2. Электронная измерительная аппаратура в измерителях с ИК.

Кроме проблем, связанных с конструктивной разработкой ИК для конкретной задачи, что будет рассмотрено ниже, другой общей проблемой является обеспечение интегрирования сигнала с ИК с высокими параметрами. Если в качестве интегратора использовать простую RC - схему (рис.1а), то изменение напряжения на его выходе равно

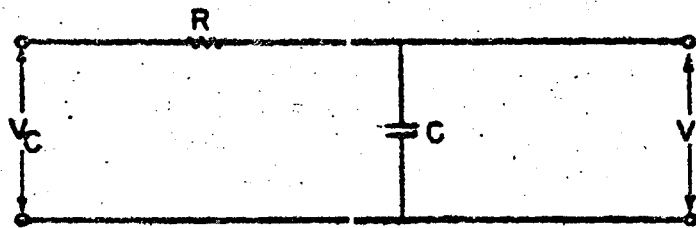
$$\Delta U = \frac{1}{RC} \int_{t_1}^{t_2} U_c dt \quad (\text{для } t_2 - t_1 \ll RC). \quad (2)$$

Подставляя в (2) значение U_c из (1), получим, что изменение поля в катушке равно

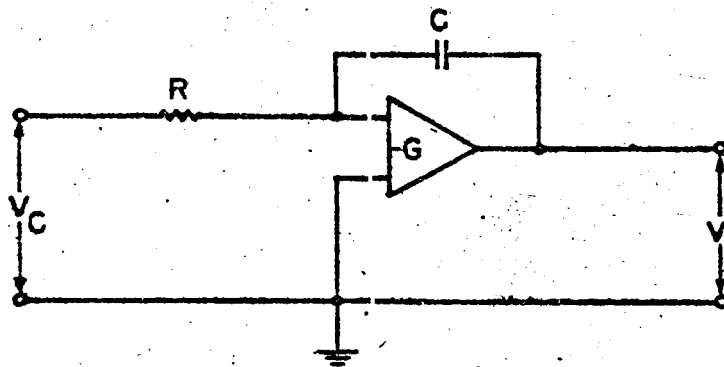
$$B_2 - B_1 = \left(\frac{RC}{N_{\text{катуш}} \cdot S_{\text{ср}}} \right) \Delta U \quad (3)$$

Такой RC - интегратор ограничен быстрым затуханием выходного напряжения интегратора, т.к. обычно постоянная RC менее 10с , а время интегрирования $t_2 - t_1 \ll RC$.

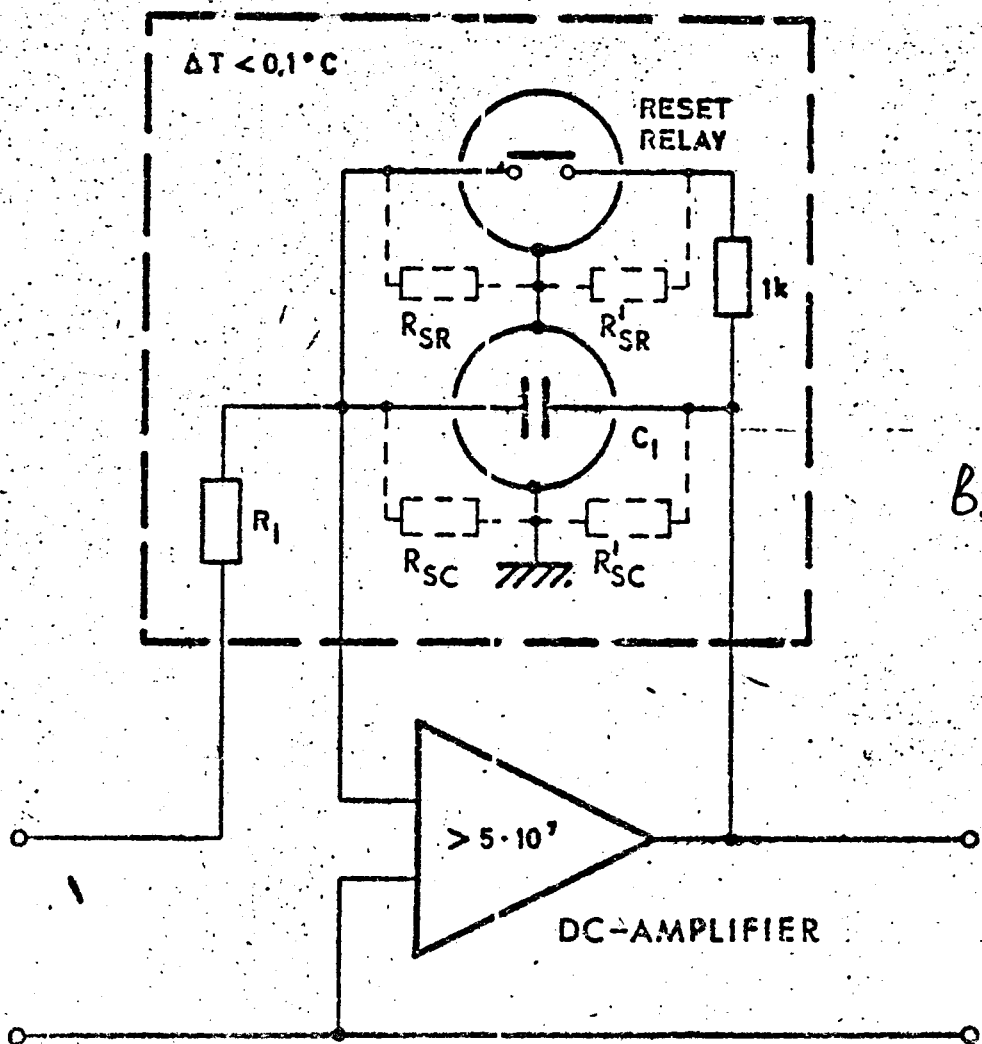
В настоящее время в качестве интегратора в магнитометрах с ИК чаще используется так наз. интегратор Миллера (рис. Iб) /1/. В этом случае время затухания выходного сигнала равно GRC , где G - коэффициент усиления операционного усилителя ($> 10^4$). В этом случае ошибка интегрирования обычно определяется не столько временем затухания, сколько другими параметрами интегратора. Ошибку в работу интегратора вносят температурный дрейф усилителя и нестабильности конденсатора (ток утечки и эффект диэлектрической абсорбции). Ряд современных операционных усилителей обладают дрейфом менее $1 \text{ мкВ}/^\circ\text{C}$, усилением более 10^6 и высоким входным сопротивлением более 10^{10} Ом . Для интегратора Миллера наиболее подходят по параметрам конденсаторы с полистереновым или тефлоновым изолятором. Отбирая конденсаторы, можно достичь стабильности по абсорбционному эффекту лучше 10^{-4} , а согласуя сопротивление и конденсатор, реально получить температурный коэффициент $RC \sim 10^{-5}/^\circ\text{C}$. В качестве хорошего примера служит интегратор, разработанный в ЦЕРНе /24/. В нем использован усилитель с дрейфом $\sim 0,5 \text{ мкВ}/^\circ\text{C}$ и усилением $\sim 5 \cdot 10^7$. Все компоненты интегратора помещены в термостате (рис. Iв) с $\Delta t \sim 0,1^\circ\text{C}$, что значительно снижает влияние температурных ошибок. Особое внимание обращено на снижение поверхностных токов в конденсаторе и в запяляющем реле, для чего сделано соответствующее заземление экранов.



a.



b.



b.

Рис. 1.

Применен тефлоновый конденсатор с $TKE \sim 40 \cdot 10^{-6} / ^\circ C$, с сопротивлением изоляции $\sim 10^{13}$ Ом и диэлектрической абсорбцией $\sim 30 \cdot 10^{-6}$. В течение 3-х месяцев стабильность постоянной времени была менее $\pm 50 \cdot 10^{-6}$ ($RC \sim 30 \text{ мс}$). Постоянные затухания выходного сигнала более 100 кс.

Для измерения магнитных полей с большой скоростью нарастания простие RC - интеграторы предпочтительны, так как допускают скорости до 10^{16} Гс/с, а интеграторы Миллера до 10^7 Гс/с/Г/.

Наиболее современным является "цифровой интегратор", т.е. интегрирующий цифровой вольтметр, работающий в открытом режиме интегрирования. В приборе выходное напряжение собственно интегратора Миллера зануляется всякий раз, когда достигает определенного уровня. Частота импульсов зануления измеряет амплитуду входного напряжения, тогда как алгебраическая сумма их дает временной интеграл входного напряжения. На наиболее чувствительном диапазоне цифровой интегратор сравним с лучшими интеграторами Миллера^{/1/}. В работе^{/27/} указан подобный интегратор, использующий прецизионный преобразователь напряжения-частота с последующим счетчиком и с регистрацией на ЭВМ.

В ряде измерителей с ИК производят компенсацию дрейфа интегратора, периодически возвращаясь в исходную точку, регистрирует возникшую ошибку и корректируют промежуточные результаты измерения. С учетом линейного характера нарастания ошибки^{/6,27,18/}, или проводя два измерения поля с прямым и обратным включением^{/23/}.

Что касается последующей электронной аппаратуры для преобразования сигналов с измерительных каналов, их регистрации и обработки, то по структуре и используемой технике она сходна с системами сбора и обработки данных, например, холловских измерителей. Поскольку часто имеются несколько входных каналов, поэтому их обычно через

мультиплексор последовательно подает на высокоточные (10^{-4} – 10^{-5}) цифровые вольтметры (Ц.В.) или аналого-цифровые преобразователи (АЦП). Результаты измерения в цифровом виде затем поступают на ЭВМ или в автономную систему с микропроцессором, где обрабатываются по специальной программе. Окончательные результаты распечатываются на телетайпе и накапливаются в памяти ЭВМ. Обычно ЭВМ с промежуточной аппаратурой (часто в стандарте КАМАК) осуществляет автоматизацию привода датчиков магнитоизмерительной системы и регистрацию положения датчиков с распечаткой их координат вместе с результатом измерения магнитного поля.

Магнитоизмерительная методика с ИК обеспечивает высокие относительные точности до $\sim 10^{-5}$, однако и для получения этих точностей, а тем паче абсолютных точностей неосходима калибровка измерителей. Здесь, как и в холловской методике, наиболее точную калибровку проводят в однородных магнитных полях с применением ЯМР – магнитометров. При этом комбинированная ИК вращается в поле или поворачивается на 90 или 180° , а сигналы измеряются через работающие совместно с этой ИК регистраторами. В таких установках легко определять эффективную площадь катушки, сравнивать ИК между собой и т.д. Кроме того, часто измерения с ИК приходится привязывать к абсолютному значению магнитного поля в какой-то измеряемой точке.

3. Примеры использования ИК в измерениях топографии полей.

Рассмотрим в качестве примеров некоторые измерительные системы с ИК и их характерные особенности. Достаточно простые, быстрые и точные магнитометры /1,6,18/ для измерения топографии стационарных полей транспортных дипольных магнитов используют точечные ИК,

которые перемещаются в измеряемом объеме поля. Сигналы с ИК, соответствующие изменению пронизывающего их потока, интегрируются и поступают на регистратор (ЦВ или АЦП) с последующей печатью результатов или подачей их в память ЭВМ для ^{последующей} обработки. Для измерения вектора поля совмещают три подобных катушки, ориентированных по соответствующим координатам. Такие системы разработаны в *LRL*, Беркли^{/6/}, и в *FNAL*, Батавия^{/18/}. Три катушки с эффективной площадью от 250 до 4500 см² совмещены в единый ансамбль и перемещаются с управлением от ЭВМ либо шаговым двигателем^{/1/}, либо непрерывно ("летающий" режим) со скоростью до 0,5 м/с. Точность установки ИК достигает $\pm 0,03$ мм. Для регистрации используется АЦП (12 бит) и ЦВ (0,01%) с ЭВМ *PDP* - II/5 он-лайн. Системы прокалиброваны по ЯМР. Абсолютная точность измерений $\sim (0,1-0,01\%)$. Чтобы компенсировать дрейф интегратора, начало и конец прохода совмещают в одной точке (или даже в точке, экранированной μ -металлом^{/6/}), а результаты измерений корректируют с учетом дрейфа.

Чтобы измерять магнитные поля в точке, когда поля неоднородны, естественно применять ИК с малыми размерами. Однако чувствительность таких ИК очень низка. Получить высокую чувствительность и точность измерений можно с большими по размерам сферическими ИК, но редко используемыми, или с простыми цилиндрическими ИК, которые имеют определенные соотношения внешнего и внутреннего диаметров и длины^{/26/}. Потокосцепление этих ИК зависит только от поля в центре их. В работе^{/25/} также рассматривается подобная катушка и указывается, что лучшие результаты получаются при так наз. ортоциклическом методе намотки, когда одновитковые петли укладываются точно параллельно друг другу. Эти замечания относятся и к длинным катушкам для

измерения плоских магнитных полей. Катушка по длине располагается вдоль координаты, от которой поле не зависит. При этом получается значительный выигрыш в площади катушки, которая измеряет практически только составляющую поля по оси ИК при условии, если размеры обмотки удовлетворяет определенному соотношению. ^{/26/}

Вариант магнитометра с длинными (1,3-2,7)м ИК, измеряющими интеграл плоского поля вдоль продольной оси магнита бустера, разработан в ЦЕРНе ^{/7/}. Измерение поля осуществляется одновременно поворотом трех ИК на 180° пневматическим мотором. Катушки калибровались различными способами с точностью до 10^{-4} . Повторяя калибровку каждые 2 недели, стабильность измерительной системы достигает $\pm 0,01\%$ для абсолютных измерений и $0,003\%$ для относительных.

Длинная по Z интегрирующая ИК при передвижении в поперечном направлении в апертуре диполя измеряет соответствующее распределение двумерного поля. Если же ИК существенно короче магнита, то перемещая ее вдоль оси Z можно измерить интегральную неоднородность вдоль оси диполя. В сверхпроводящих диполях при комнатной температуре такие измерения проводят при питании обмотки диполя переменным током с малой амплитудой ^{/10/}. Чтобы в этом случае поднять чувствительность и точность измерений топографии поля, в него помещается стационарная эталонная катушка, которая включается встречно с подвижной, обеспечивая дифференциальный режим измерения. Вообще метод относительных измерений широко практикуется в методике ИК и дает существенные преимущества ^{/25, 26/}.

Для обеспечения стабильности эффективной площади катушки в качестве материала каркаса часто используется плексиглас, который, например, обеспечил малые геометрические погрешности - лучше 10^{-4} , в

течение года^{/26/}, а ИК в эпоксидной смоле имели температурный коэффициент $\sim 3 \cdot 10^{-5} / ^\circ\text{C} / \text{I} /$.

С помощью ИК удобно измерять положение медианной и вертикальной плоскостей, а также интеграла поля в центральной области дипольных магнитов. Например, в сверхпроводящем диполе Аргонской Лаборатории определение вертикальной плоскости при комнатной температуре и питании низким переменным током проводилось с помощью длинной одновитковой петли, укрепленной на жесткой раме. Рама устанавливалась в центре апертуры диполя в вертикальном положении. Сигнал с ИК наблюдался по осциллографу и устанавливался в 0 вращением ИК относительно оси диполя. Точность определения направления поля относительно вертикали лучше $0,1^\circ$.

Более совершенная аналогичная система разработана и применяется в ФИАЛ, Батавия для проверки св.-пр. диполей E22 для Даблера. Имеется специальная протягивающаяся одновитковая ИК из вольфрамового провода ($\phi \sim 0,1$ мм). Расстояние между проводами задается укрепленными на краях кварцевыми полнорованными держателями, которые укрепляются на двух синхронно вращающихся шаговых двигателях; имеющих 20000 шагов на оборот. Угол поворота рамки регистрируется оптическим кодировщиком с разрешением 32000 отсчетов на оборот. При каждом отсчете около вертикального положения магнит сначала возбуждается до максимального поля, а затем ток снижается до 0. По нескольким отсчетам на выходе интегратора, поскольку амплитуда сигналов пропорциональна отклонению плоскости петли от направления поля, определяется угол между полем и вертикальной плоскостью с точностью $0,3$ град.

Получение интегральных значений полей последнего магнита осуществлялось этой же системой. Только катушка вначале устанавливалась

под углом 90° к вертикальной плоскости поля, а затем поворачивалась на 180° , чтобы измерить интегральное остаточное поле. После этого магнит возбуждается до различного уровня. В результате, учитывая соответствующий ток возбуждения, получается передаточная характеристика диполя, но только для интегральных полей. Из этих измерений, кроме того, определяется эффективная длина магнита при соответствующем токе. Полученные данные хорошо совпали с результатами измерений с ЯМР и датчиками Холла.

Заметим, что в приведенном примере длина катушки превышала 6,6 м, что обычно приводит к неприятному эффекту "качания" при движениях катушек и стремятся по возможности укоротить их^{/10/} и подавить эффект. В указанной работе^{/22/} достигнуты высокие результаты и нет замечаний⁰ в отношении этого эффекта.

Для изучения медианной плоскости диполей ускорителей применяется радиально ориентированная ИК, перемещаемая в горизонтальной плоскости симметрии магнита^{/26/}. Особенно удобно проводить измерения для динамической части магнитного поля. Если выходной сигнал измеряемой точке равен нулю, то она лежит на медианной поверхности. Если сигнал имеется, то по его величине можно вычислить смещение, предварительно определив чувствительность измерителя к вертикальному перемещению катушки при заданном магнитном поле.

Нужно заметить, что из-за несовершенства изготовления ИК возможно отклонение магнитной оси от геометрической, что может привести к ошибкам измерений. Так на синхрофазотроне ЛВЭ при измерении медианной плоскости не допустим наклон более 1 мин. Поэтому при необходимости требуется дополнительное измерение с ИК, повернутой на 180° вокруг радиальной оси, с последующим усреднением результатов

В магнитах с большими градиентами (сотни Гс/см) в области medianной плоскости измерения оказываются проще и с ИК с эффективной площадью $\sim 1000 \text{ см}^2$ легко достигается точность $< 0,1 \text{ мм}$.

При измерениях с точностями $\sim 0,1\%$ градиентов магнитных полей и особенно показателя спада, например, в ускорителях с жесткой фокусировкой используют две встречно включенные ИК, которые требуют тщательной юстировки их в рабочем зазоре магнита. Так при расстоянии 2 см между осями катушек ошибка в $0,1\%$ в измерении градиента вызывается ошибкой 0,02 мм в расстоянии между катушками. В этом случае необходимо уточнение положения магнитной оси относительно геометрической, как и их взаимное угловое отклонение^{/26/}. Здесь также положительный эффект дает применение относительных измерений.

4. Применение ИК для гармонического анализа полей.

Наиболее широкое применение ИК находят при измерении гармонических коэффициентов магнитного поля. Используемые для этой цели ИК можно разделить на два типа.

Первый тип - ИК, чувствительные ко всем или к большинству гармоник и позволяющие сразу получать весь спектр гармонических коэффициентов магнитного поля. Этот тип ИК будем называть гармоническим анализатором поля.

Второй тип - ИК, чувствительные лишь к одной заданной гармонике магнитного поля. Для получения гармонического состава магнитного поля требуется целый набор таких ИК для всех представляющих интерес гармоник. Такие ИК будем называть гармоническими катушками.

а) Гармонический анализатор поля (ГАП).

ГАП представляет собой ИК, вращающуюся вокруг продольной оси магнита (рис.2). Поток, связанный с ИК, измеряющей, например, B_{θ}

компоненту магнитного поля, равен

$$\Phi_{\theta}(\theta) = \mu_0 \sum_{n=1}^{\infty} K_n (a_n \cos n\theta - b_n \sin n\theta), \quad (10)$$

где K_n - коэффициент чувствительности к n -ой гармонике, зависящий от геометрии катушки. ЭДС, наводимая в такой катушке при частоте вращения ω , равна

$$\mathcal{E}(t) = -\frac{d\Phi}{dt} = \mu_0 \omega \sum_{n=1}^{\infty} n K_n (a_n \sin n\omega t + b_n \cos n\omega t). \quad (11)$$

Сигнал /II/ с ИК можно исследовать аналоговым методом с помощью волнового анализатора. Меняя частоту от 0 до $n\omega$, можно найти амплитуды n гармоник (частоты гармоник кратны ω). А с помощью осциллографа можно измерить и фазы гармоник /2,28/. Однако такой метод измерений является довольно грубым. Абсолютные точности измерения амплитуд гармоник \sim нескольких %, точность измерения фазы также невысока.

Значительно более точным является метод дискретного Фурье анализа. В этом случае измеряется Φ_{θ} или \mathcal{E} на радиусе R в N равноотстоящих точках с шагом $\frac{2\pi}{N}$, а затем численно с помощью ЭВМ находятся гармонические коэффициенты Φ_{θ} или \mathcal{E} . Так, например, для потока Φ_{θ} Фурье анализ проводится в виде

$$\Phi_{\theta} = \sum_n A_n \cos n\theta + B_n \sin n\theta, \quad (12)$$

а гармонические коэффициенты поля a_n и b_n находятся затем из выражений

$$a_n = \frac{1}{\mu_0} \frac{A_n}{K_n}, \quad b_n = \frac{1}{\mu_0} \frac{B_n}{K_n}. \quad (13)$$

При методе Фурье анализа возможно два способа снятия сигнала с ИК.

В первом случае ИК непрерывно вращается с частотой ω , напряжение с нее стробировается с высокой скоростью и преобразовывается в цифровую форму с помощью АЦП, а затем полученные данные используются

для Фурье анализа. В этом случае точность определяется в основном качеством АЦП и достигает $0,1 \pm 0,01\%$ ^{/3/}. Для получения n гармоник нужно иметь $\geq 2n$ стробируемых точек за оборот.

Другой способ основан на последовательном дискретном вращении ИК с шагом $\Delta\theta$ и интегрировании сигнала с нее. В этом случае измеряемой величиной является поток $\Phi_\theta(\theta)$. Интегрируемый сигнал преобразуется затем в цифровой код и также используется для Фурье анализа.

Таким образом все описываемые ниже конкретные системы измерения гармонических коэффициентов поля с помощью ГАП можно объединить в три группы.

1. Системы с аналоговым гармоническим анализом с помощью волнового анализатора ^{/2,28/}. Это системы с ограниченной точностью измерений и плохо поддающиеся автоматизации.

2. Системы с дискретным вращением и интегрированием сигнала ^{/3, II, 12/}. Эти системы предполагают использование ЭВМ в режиме оф-лайн для Фурье анализа.

3. Системы с непрерывным вращением ИК и быстрым стробированием сигнала ^{/3/}. Такие системы, работающие в режиме он-лайн с ЭВМ, полностью автоматизированы, имеют большую скорость измерений, высокую точность и соответственно более высокую стоимость. Так согласно оценке ^{/3/} такая система в 3 раза дороже, чем система с дискретным вращением.

Системы, основанные на дискретном Фурье анализе, позволяют с достаточно высокой точностью найти гармонические коэффициенты Φ_θ или \mathcal{E} , из которых затем по формулам (13) для Φ_θ или аналогичным для \mathcal{E} вычисляются гармонические коэффициенты поля. Для этого необходимо знать коэффициенты чувствительности K_n для данной конкретной катушки.

На рис. 3 показаны плоские одновитковые катушки, измеряющие радиальную (А) и азимутальную (В) компоненты магнитного потока.

Для них коэффициенты K_n соответственно равны $|I_2|$

$$K_{A_n} = 2\ell z^n \cdot \sin n \frac{(\theta_2 - \theta_1)}{2}, \quad K_{B_n} = \ell (z_2^n - z_1^n), \quad (14)$$

где ℓ - длина катушки.

Член $\sin(n \frac{\theta_2 - \theta_1}{2})$ в K_{A_n} не позволяет получить хорошую чувствительность для всех гармоник. Этот член можно сделать $\sim I$ для данного n , но он может оказаться $\ll I$ для других n и точность измерения этих гармоник будет низкой. Обычно $\theta_2 - \theta_1$ выбирают таким, чтобы получить наибольшую чувствительность к наивысшей из измеряемых гармоник, теряя при этом в чувствительности к более низким гармоникам. Увеличение числа витков для повышения чувствительности катушки усложняет операцию намотки и точное вычисление K_n .

Поэтому катушка типа В предпочтительней при измерении гармоник поля, так как она имеет хорошую чувствительность ко всем гармоникам поля и более простую конструкцию.

Еще один тип катушки показан на рис. 4^{1/2}. В ней проводники одного направления расположены на азимуте θ от R_1 до R_2 с линейной плотностью λ , а проводники обратного направления поровну на азимутах $\theta + \alpha$ и $\theta - \alpha$. Для такой катушки

$$K_n = \frac{\lambda \ell}{n+1} [(R_2^{n+1} - R_1^{n+1}) - (R_2'^{n+1} - R_1'^{n+1}) 2 \cos n\alpha]. \quad (15)$$

Возможны и другие типы катушек. Так, например, система из двух катушек типа А (рис. 3) симметричных относительно оси магнита и соединенных навстречу друг другу чувствительна лишь к нечетным гармоникам, а аналогичная система катушек типа В - только к четным.

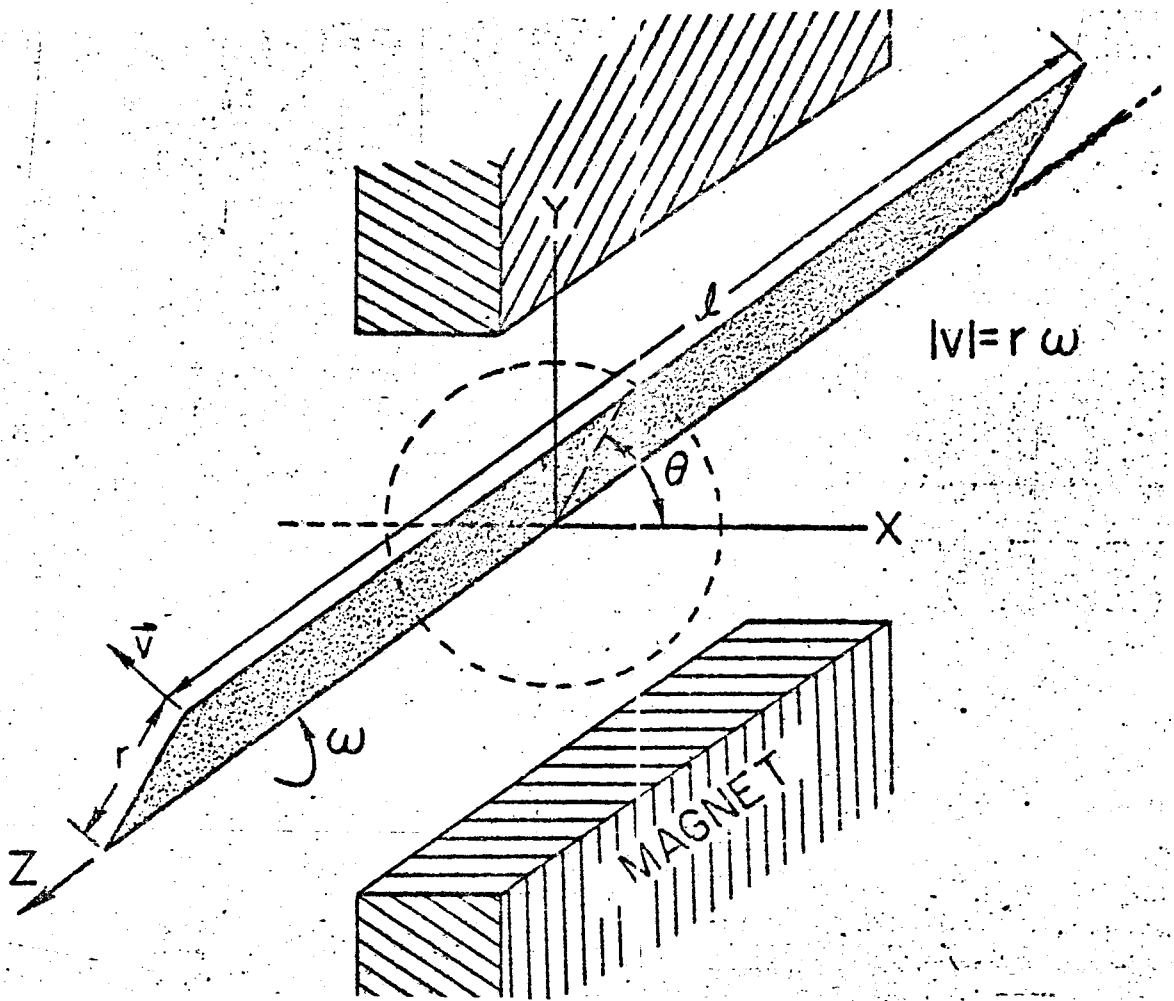
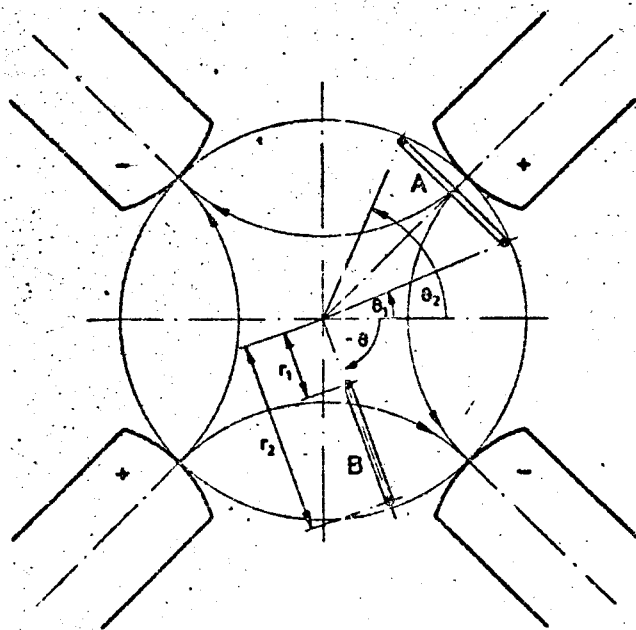


Рис. 2.



A: Radial Field Coil
 B: Azimuthal field Coil

Рис. 3.

К создаваемым ИК предъявляются следующие требования:

- 1) Высокая чувствительность, особенно к вышним гармоникам.
- 2) Возможность исследования поля как можно ближе к полюсам.
- 3) Простота конструкции, намотки, регулировки.
- 4) Низкая чувствительность к геометрическим погрешностям.
- 5) Возможность компенсации основной гармоники поля.

Погрешности в геометрии катушек влияют на точность вычисления коэффициентов K_n , которые в свою очередь, как видно из (13), определяют точность нахождения гармонических коэффициентов поля. Влияние различных геометрических погрешностей на точность K_n зависит от конкретного вида катушки. Например, для катушки типа В (рис.3) основное влияние на точность K_n оказывает погрешность в τ_1 и τ_2 . Так при $\Delta z = 0,5$ мм и $\tau_2 = 0,1$ м: $\frac{\Delta K_n}{K_n}$ равно $\sim 1\%$ для $n = 2$; $\sim 1,5\%$ для $n = 3$ и $\sim 2\%$ для $n = 4$ /12/.

Для повышения точности измерений высших гармоник желательно подавлять основную гармонику магнитного поля. Сигнал с ИК подавленной основной гармоникой значительно меньше, он может дополнительно усилен, не вызывая проблемы с линейностью интегратора. Компенсация основной гармоники позволяет улучшить воспроизводимость измерений в $10 \div 100$ раз /12/. Для катушки В рис.3 компенсация достигается с помощью второй катушки с радиусами τ_3 и τ_4 , расположенной в той же плоскости (рис.5). Условие компенсации n -ой гармоники следующее - $\tau_2 \approx \sqrt{\frac{N_2}{N_1} (\tau_4^n - \tau_3^n) + \tau_1^n}$, где N_1 и N_2 число витков. В катушке на рис.4 компенсация достигается соответствующим выбором угла α .

Ниже рассмотрены некоторые конкретные измерительные системы, используемые для гармонического анализа поля в магнитах.

Две измерительные системы на основе промышленных приборов рассмотрены в /3/.

В шаговой методике применялся Ц.В. ИР2401С для интегрирования сигнала с ИК. Данные записывались на цифropечатающем устройстве. Время одного шага $1,8^{\circ} \sim 1с$, а весь диапазон 360° проходил за 7 мин. Здесь важным моментом являются переходные процессы в начале и конце движения. Так как напряжение на катушке есть производная во времени, то скоростные и ускорительные характеристики прямо влияют на выходной сигнал и на работу ЦВ. Рекомендуется использовать демпфированный шаговый мотор для улучшения общих характеристик измерений. Метод позволяет обойтись при передаче сигнала с ИК на интегратор без щеточных контактов.

Более совершенная система гармонического анализатора проектируется^{/3/} на основе метода непрерывного вращения катушки со стробированием и использованием ЭВМ (рис.6). ИК вращаются гистерезисно-синхронным мотором (I/8HP) со скоростью 19 обор./с, контролируемой кварцем с точностью $\pm 0,01\%$. Сигналы с ИК достаточно большие и будут сниматься через систему щеток. Высокоскоростной АЦП с точностью $\pm 0,01\% \div 0,02\%$ (14 бит) стробирует и преобразует в цифровую форму сигналы с непрерывной скоростью 4064 стробов в секунду или 253 на оборот. Синхронизация стробов точно определяется фотоэлектрическим декодером, который точно связывает время строба и положение ИК. Благодаря этому получаемые стробированные значения формы сигнала могут быть прямо использованы в расчете по дискретному Фурье - преобразованию. Без синхронизации от декодера было бы необходимо проводить полный анализ спектра, требующий значительно больше расчетов и снижающий точность результатов. Более того, синхронизация позволяет, повторяя циклы, проводить цифровое усреднение для повышения отношения сигнала к шуму, что может оказаться полезным. Ожидается,

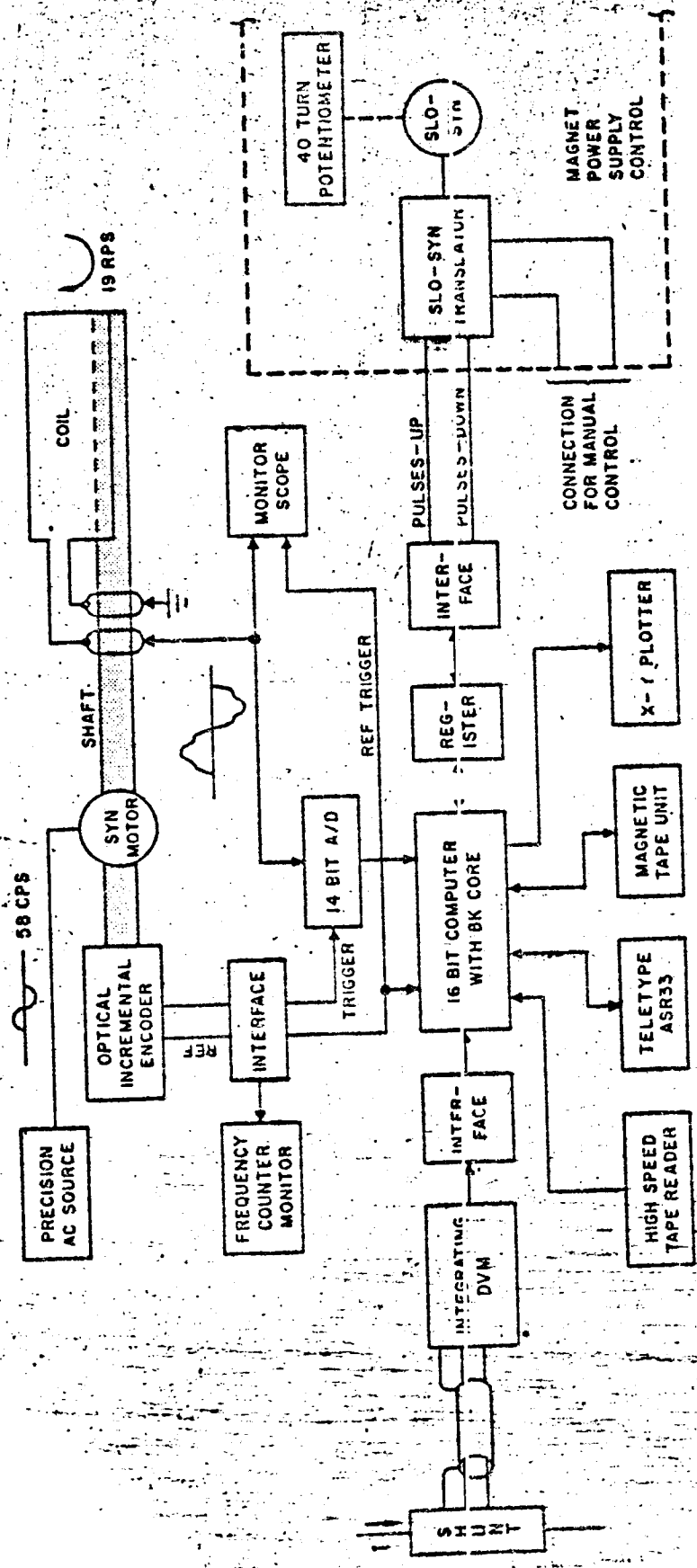


FIG. 6.

что можно получить общую точность $\pm 0,02\%$. В этой же системе ЭВМ контролирует ток магнита с точностью $\pm 0,01\%$ посредством шагового мотора. Для удобства работы ЭВМ обеспечивается рядом периферийных устройств - вводом программ, дисплеем, телетайпом, графопостроителем и др. Сама ЭВМ небольшая, общего назначения с 16 бит. размером слов, временем цикла ~ 2 мкс, время умножения ~ 25 мкс. По 256 точкам анализ для 14 гармоник потребует ~ 1 сек. и объем памяти ~ 8 К. В этой относительно сложной системе для удобства контроля ее используется осциллограф, по которому наблюдается сигнал с ИК, и измеряющий скорость вращения частотомер.

В работе ^{/12/} приведена измерительная система с ИК типа В (рис. 3) с компенсированной основной гармоникой.

Измерительная шаговая система с такой ИК автоматизирована с помощью ЭВМ ИР2114, 16 бит. В качестве интегратора применен ЦВ с двойным интегрированием. Дрейф компенсируется за счет вращения в прямом и обратном направлении с последующим усреднением результатов. Катушки намотаны многожильным проводом и укреплены на стекло-эпоксидной раме. Угловой поворот осуществляется шаговым мотором по 3° и механически регистрируется в пределах 0,1 мрад. Точность кругового движения в пределах 0,01 мм. Механическая и магнитная оси совмещаются по измерениям в пульсирующем поле. Относительные полевые ошибки в коэффициентах из-за погрешности в высоте катушек (0,1 мм) менее, чем $3 \cdot 10^{-4}$ вплоть до $n = 20$, а из-за радиальной неопределенности ($\sim 0,05$ мм) $\sim 10^{-2} \div 10^{-3}$. Воспроизводимость по полю достигала $5 \cdot 10^{-5}$.

Похожая ИК с компенсацией ^{/11/} использовалась для измерения гармоник квадрупольных магнитов для UNILAC (рис.7). Сигналы с ка-

тушек смешиваются в определенном соотношении, чтобы оптимизировать чувствительность к гармоникам с $n > 2$. Особо отмечается, чтобы ось вращения ИК и их витки точно лежали в одной плоскости. Шаг вращения $\sim 9^\circ$, точность угловой установки лучше $0,02^\circ$. Регистрация на интеграторе после паузы $\sim 1-2$ с для ускорения. Цикл измерения ~ 1 мин. Число витков в ИК до 100. Точность определения положения витков \sim сотых мм. Дрейф интегратора учитывается по 1 и последнему измерениям (0° и 360°). Точности измерения и воспроизводимости $\sim (0,02 \div 0,003)\%$ для n до 14. Подобные результаты приводятся в работе /7/, подтверждающая высокую эффективность компенсации и возможность повышения точности в 100 раз. Отмечается важность снижения ошибок ИК по радиусу и уменьшением расстояния между обоими обмотками по радиусу. Измерительная труба с ИК устанавливалась внутри магнитов с точностью ~ 5 мкм.

Неплоская ИК с компенсацией 2-ой гармонике приведена в /2/ (рис.4). ИК непрерывно вращается, а ее выходной сигнал измерялся промышленным гармоническим анализатором. Центрирование ИК, как и в других случаях, проводится механическими устройствами, сводя сигнал, соответствующий $n = 1$, к минимуму.

б) Гармонические катушки.

Как показано в /13,14/, ИК, витки которых расположены по закону $N(\theta) \sim \cos n\theta$, обладают чувствительностью только к n -ой гармонике магнитного поля. Каждая гармоника имеет две составляющих "Синусную" и "Косинусную". Их можно измерить двумя катушками, повернутыми на угол $\pi/2n$ одна относительно другой, или же несколькими измерениями одной катушкой при разных ее угловых положениях. На рис.8 показана градиентная катушка /14/, измеряющая квадрупольную составляющую магнитного поля.

Вследствие дискретности намотки и дефектов изготовления каждая катушка обладает "паразитной" чувствительностью и к другим гармоникам поля. Поскольку эта чувствительность много меньше чувствительности к собственной гармонике катушки, то реальный вклад в сигнал дает лишь основная гармоника магнитного поля, амплитуда которой много больше остальных. Чтобы исключить ее влияние, производится несколько измерений при разных положениях катушки, что позволяет учесть паразитный сигнал. ^{/15/}

Также как и в ГАП погрешности в геометрии катушек влияют на точность нахождения гармонических коэффициентов, причем наибольший вклад вносит погрешность в радиальном положении витков. Так абсолютная погрешность n -ой гармоники, связанная с неточностью радиального положения витков равна $\delta a_n / a_n = n \delta R / R$.

В отличие от вращающихся катушек, которые предназначены для измерения стационарных полей и требуют сложную измерительную аппаратуру, гармонические катушки могут работать и в стационарном и в импульсном полях и требуют более простые аппаратуру и процедуру при регистрации выходных сигналов.

В работе Г.Моргана ^{/5/} предложен упрощенный вариант гармонических катушек, которые иногда называют "катушками Моргана".

Катушки Моргана являются наиболее элементарным приближением к ИК с косинусной намоткой. На рис. 9 показан вид намотки ИК, которая чувствительна только к 6-польной составляющей поля ($l_2 = 3$). Подобные катушки, чувствительные к $2l_2$ -польным гармоникам имеют $2l_2$ проводников, равномерно распределенных по цилиндрической поверхности. Хорошо сделанная катушка не чувствительна к более низким гармоникам. имеет пониженную чувствительность к нечетным мультиполям собственно

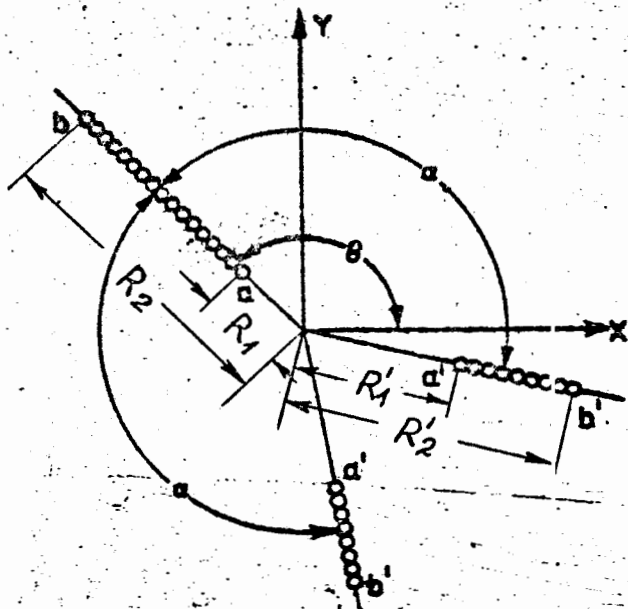


Рис. 4.

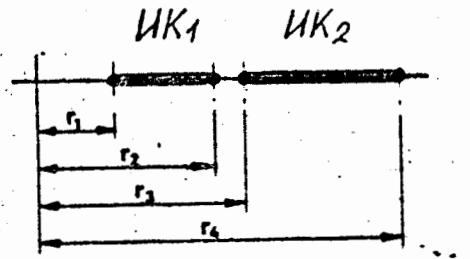


Рис. 5.

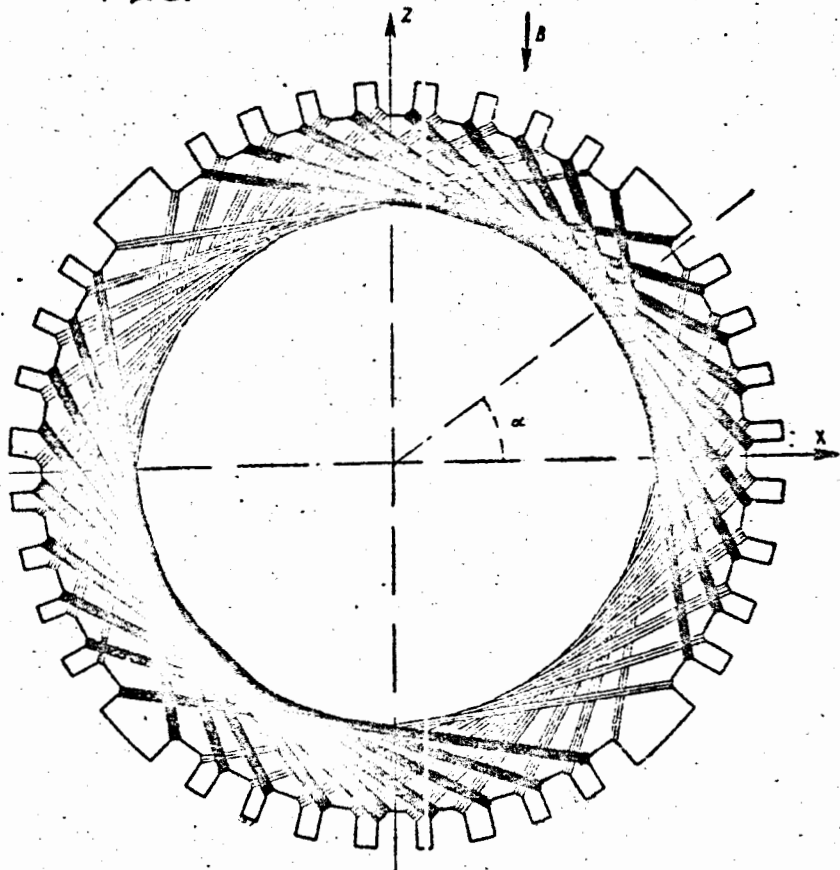


Рис. 8 Градиентная катушка (вид с торца).

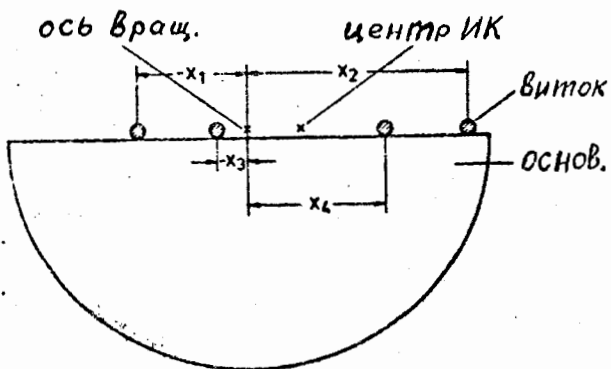


Рис. 7.

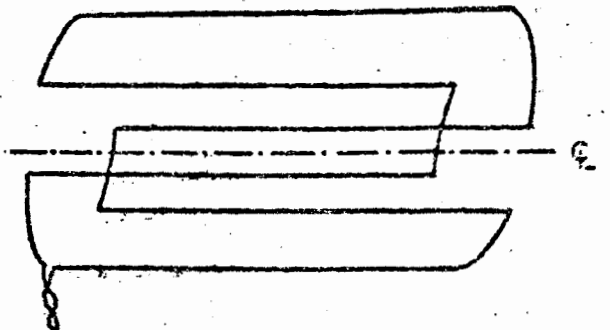


Рис. 9.

гармоники и не имеет чувствительности к четным мультиполям. Выходное напряжение катушки для m гармоники обусловленное K -ой мультиполью ($K = 1, 3, 5 \dots$), равно $\epsilon_K = 2Lz\dot{C}_n / K$, где L и z , соответственно, - длина и радиус катушки, $n = Km$, а \dot{C}_n - скорость изменения во времени n -ой гармоники поля на радиусе z , т.е. $C_n = n A_n z^{n-1}$, где A_n - коэффициенты Фурье - разложения синфазной компоненты вектора потенциала.

Обычно на один цилиндрический каркас наматываются ИК для всех интересующих гармоник, причем по две ИК на каждую гармонику для обеих компонент. Ограничение возникает из-за трудностей пространственного распределения витков более высоких мультиполюсных катушек.

Если желательно измерить гармонику, которая составляет $\sim 10^{-4}$ от основной, требуется угловая точность намотки $\sim 10^{-4}$ рад, или, например, для катушки с диаметром 4,5 см боковое смещение $\sim 2,2 \cdot 10^{-4}$ см. Эти результаты трудно достигнуть при комнатной t° , тем паче, если нужно измерять при гелиевых температурах. Возможно вводить компенсацию дипольных или квадрупольных составляющих из-за конструктивных ошибок, включая последовательно с соответствующими ИК дополнительные обмотки.

Принципиальный недостаток катушек Моргана - их низкое выходное напряжение, когда они медленно вращаются или используются со слабо изменяющимся полем. Сигнал можно увеличить за счет числа витков, но тогда ухудшается конструкционная точность. Другая возможность увеличения числа витков - это перейти к обмотке с CPS -плотностью, что дает дополнительно преимущество в уменьшении чувствительности к более высоким мультиполям. Но возникает трудность с наложением

нескольких ИК на один цилиндр, хотя возможно использование нескольких концентрических цилиндрических каркасов.

в) Измерения гармоник сверхпроводящих диполей ФНАЛ.

При создании дипольного св.-пр. магнита для "Даблера" в ФНАЛе гармонический анализ поля проводился гармоническими ИК различной конструкции /19-22/. Наиболее популярными² оказались ИК типа Моргана. Использовались катушки 2-х размеров - диаметр 4 см, длина 1 м и диаметр 2,5 см, длина 30 см. Измерялись гармонические компоненты в различных частях диполей. Отмечается трудность при центрировании ИК. Эксцентricность катушки действовала на амплитуды гармоник, особенно на четвертую. Использовались ИК для измерения 4-, 6-, 8- и 10-ти польных коэффициентов. 12-ти и 18-ти-польные коэффициенты извлекались из результатов измерений более низкопольных ИК. Все коэффициенты измерялись для постоянных и импульсных полей от 5 кГс до 40 кГс, а 6-ти польный коэффициент и при остаточном поле (влияние намагничивания св.-проводника).

Для работы при постоянном поле катушки Моргана вращаются. Данные измеряются в 1024 точках и накапливаются. После восстановления формы сигнала она анализируется быстрым Фурье - преобразователем, а амплитуды и фазы каждой гармонической компоненты распечатываются. Для увеличения точности опорный импульс от фотодекодера угла поворота используется для запуска АЦП, который обеспечивает отсчеты всегда в одних положениях ИК. В импульсном поле катушка находится в стационарном положении. Эта процедура повторяется для 32 положений ИК. Затем проводится Фурье - анализ. Вся система съема данных состоит из соответствующих блоков КАМАК с ЭВМ PDP-11/10 с 28К, он-лайн.

5. Заключение.

Проведенное рассмотрение магнитсизмерительной методики с ИК показывает, что она обладает как высшими метрологическими возможностями, так и позволяет измерять многие характеристики магнитных систем, показывая при этом уникальные возможности.

Если при измерениях топографии магнитных полей магнитометры с ИК наравних соперничают с холловскими по достигнутой точности и несколько уступают по конструктивным параметрам, по простоте и наглядности, то в измерениях геометрических [?] интегральных характеристик дипольных и квадрупольных магнитов для ускорителей, а также в определении интегральных гармонических составляющих их полей измерители с ИК пока вне конкуренции.

Опыт работы в *BNL* и *FNAL*, США, по измерению ряда характеристик св-пр. дипольных магнитов, как в теплом, так и в холодном объемах, с использованием ИК, подтверждает их эффективность и перспективность.

Повидимому основным направлением работ по методике измерений дипольных и квадрупольных магнитных полей с ИК с одной стороны будет дальнейшая модернизация наиболее эффективных ИК для регистрации гармонических составляющих и геометрических параметров полей, а с другой - максимальная автоматизация, применение быстродействующих и высокоточных устройств преобразования и регистрации с возможностью обеспечения относительных точностей до $10^{-4} \div 10^{-5}$, а также широкое использование в системе обработки результатов микропроцессоров и ЭВМ. Представляется рациональным каждую разновидность измерений с ИК параметров магнитной системы организовать автономно на уровне

специализированной подсистемы на основе микропроцессоров, но чтобы каждая подсистема могла подсоединяться он-лайн к общесистемной ЭВМ для комплексных серийных измерений.

Общая система должна, кроме того, обеспечивать все операции в процессе измерений - механические передвижения и их точную регистрацию контроль и управление током питания магнитных систем и др. необходимые операции.

При разработке систем ИК следует обратить внимание на создание многофункциональных ИК, которые позволяют без дополнительных механических установок измерять максимальное число параметров. Например, желательно применять систему ИК с набором требующихся гармонических катушек или компенсированную вращающуюся плоскую ИК, ^{которая обеспечивает} возможность измерения всех гармоник поля.

При работе с ИК, чтобы достигнуть высокой точности измерения и их воспроизводимости, необходимо обращать особое внимание на обеспечение соответствующих механических точностей изготовления ИК, их установки и контроля. Кроме того, потребуется решить ряд проблем, связанных с калибровкой систем с ИК разного назначения.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. P. G. Watson et al., Proc. 1st. Int. Conf. on Magn. Techn., Stanford, 1965, 333.
2. R. J. Lazi et al., Proc. 1st. Int. Conf. on Magn. Techn., Stanford, 1965, 487.
3. J. K. Cobb et al., Proc. 3d. Int. Conf. on Magn. Techn., Hamburg, 1970, 1439.
4. J. H. Cupland et al., Proc. 4th. Int. Conf. on Magn. Techn., Brookhaven, 1972, 737.
5. G. H. Mezgan, Proc. 4th. Int. Conf. on Magn. Techn., Brookhaven, 1972, 787.
6. C. G. Dobs, Proc. 4th. Int. Conf. on Magn. Techn., Brookhaven, 1972, 791.
7. K.-D. Lohmann, Proc. 4th. Int. Conf. on Magn. Techn., Brookhaven, 1972, 745.
8. J. Allinger et al., Proc. 4th. Int. Conf. on Magn. Techn., Brookhaven, 1972, 758.
9. W. B. Sampson et al., Proc. 4th. Int. Conf. on Magn. Techn., Brookhaven, 1972, 752.
10. S. T. Wang et al., Proc. 5th. Int. Conf. on Magn. Techn., Roma, 1975, 219.
11. B. Langenbeck, Proc. 5th. Int. Conf. on Magn. Techn., Roma, 1975, 237.
12. C. Wyss, Proc. 5th. Int. Conf. on Magn. Techn., Roma, 1975, 231.
13. В. Н. Данильцев, В. К. Плотников, ПТЭ № 3, 1963, 20.
14. Н. Н. Греков и др., ПТЭ, № 2, 1956, 29.
15. М. М. Кац и др. Препринт ИТЭФ, № 666, 1969.
16. С. А. Ильевский и др. Препринт ИФВЭ.
17. А. А. Алексеев и др. Препринт ИФВЭ, ОИ 68-62, 1968.
18. R. Yamada et al., Proc. 5th. Int. Conf. on Magn. Techn., Roma, 1975.
19. R. Yamada et al., IEEE Trans. on Magn., V. MAG-13, n1, Jan., 1977.
20. R. Yamada et al., IEEE Trans. on Nucl. Sci., V. NS-24, n3, June, 1977.
21. R. Yamada et al., FNAL, TM-726, Apr., 1977.
22. R. Yamada et al., Proc. Int. Conf. on Cryogenics, Aug. 1977.
23. J. P. Gourber, Proc. 3d. Int. Conf. on Magn. Techn., Hamburg, 1970, 1412.
24. N. Henzichsen, Proc. 3d. Int. Conf. on Magn. Techn., Hamburg, 1970, 1403.
25. P. Sack et al., Proc. 3d. Int. Conf. on Magn. Techn., Hamburg, 1970, 1484.
26. Л. Л. Гольдин и др. Магнитные измерения в ускорителях заряженных частиц. Госатомиздат, М, 1962.
27. W. Eschricht et al., Proc. 6th. Int. Conf. on Magn. Techn., Bratislava, 1977.
28. J. Cobb, R. Cole, Proc. 1st. Int. Conf. on Magn. Techn., Stanford, 1965, 431.

В. ХОЛЛОВСКАЯ МЕТОДИКА В МАГНИТОМЕТРИИ.

1. Введение.

За прошедшую четверть века после создания на основе полупроводниковых материалов датчиков Холла (ДХ) с достаточно высокими и стабильными параметрами Холловская методика в магнитометрии достигла значительных результатов^{/1/}. Она отличается уникальными метрологическими возможностями и многообразием практических применений. Холловские магнитометры стали одним из наиболее распространенных средств измерения характеристик магнитных систем в ускорительной технике и в экспериментальной ядерной физике.

ДХ работают в широком диапазоне магнитных полей $-(10^{-4} \div 20) \text{ Т}$. Они являются практически безинерционными (рабочие частоты выше ГГц). Лучшие образцы ДХ имеют линейную характеристику преобразования магнитного поля в напряжение (до 10^{-3}). Размер чувствительной области ДХ (площадь $- 1 \div 0,01 \text{ мм}^2$, толщина $- 0,01 \text{ мм}$) обеспечивает практически измерения в точке. ДХ обладают ~~высокой~~ чувствительностью $-(100 \div 5 \cdot 10^3) \text{ мВ/Га}$, а при питании повышенным импульсным током еще на порядок выше, которая позволяет регистрировать сигнал с ДХ цифровым вольтметром (ЦВ) непосредственно или с минимальным промежуточным усилением. Современные ДХ (например, типа *SBV579*, *SBV 585* фирмы Филипс или отечественные типа ДХ-600÷ДХ-612, СКБ ФТИ, Ленинград) имеют весьма низкие температурные коэффициенты постоянной Холла до $10^{-4}/^\circ\text{C}$ и менее. В ряде случаев важным свойством является чувствительность ДХ к направлению магнитного поля, а также возможность работы при $\sim 4,2 \text{ К}$.

Холловские магнитометры измеряют распределения в пространстве и времени полей в магнитных системах, которые имеют объемы от

10^{-6} м^3 до десятков $\text{м}^3 / 3/$, градиенты до 1 Т/см , скорости изменения поля свыше 4 Т/мс . Кроме того, они позволяют регистрировать величину и направление магнитного поля или для сокращения времени проводить измерения поля одновременно во многих (до 100) точках. При всем этом точность относительных измерений, а при соответствующей калибровке и абсолютная точность, достигают значений $\sim 10^{-3} \div 10^{-4}$.

2. Погрешности измерения ДХ.

Однако, чтобы достигнуть таких высоких точностей в указанном диапазоне, требуется четко представлять основные источники погрешностей, зависящие от ДХ, и соответствующим образом уменьшать их влияние на результирующую точность измерений.

В качестве материала для изготовления высокоточных ДХ применяют следующие соединения In Sb , In As , In As P с определенной концентрацией основных носителей. Обычно сопротивления таких датчиков составляют $\sim (1 \div 5) \text{ Ом}$. Вследствие изменения внешней температуры, а также измеряемого поля, эти сопротивления изменяются. Особенно сильно и нелинейно влияет на сопротивление ДХ магнитное поле $^3/$. Так в поле $\sim 2 \text{ Т}$ магниторезистивный эффект достигает $\sim 100\%$. Поэтому, во-первых, чтобы устранить влияние выходного сопротивления ДХ на точность регистрации выходного сигнала, необходимо иметь входное сопротивление измерительной схемы в $\sim 10^4 \div 10^5$ раз большим, чем у ДХ.

Другим проявлением магниторезистивного эффекта является т.н. планарный эффект $^3,6/$. В его основе лежит различное влияние на сопротивление ДХ продольного и поперечного магнитных полей. Пред-

ставим ДХ в виде 4-х полюсного сбалансированного резисторного моста, расположенного в плоскости ДХ, как показано на рис. I. Если B_p - вектор поля в плоскости ДХ, то напряжение на выходе из-за планарного эффекта равно

$$V_p = \frac{1}{2} \cdot B_p^2 I R_0 (\alpha_T - \alpha_L) \sin 2\Phi,$$

где α_T - поперечный магниторезистивный коэффициент,

α_L - продольный магниторезистивный коэффициент,

I - ток через ДХ

R_0 - сопротивление ДХ без магнитного поля.

Приведенное соотношение в основном справедливо для полей до 1Т, для более высоких полей V_p изменяется приблизительно пропорционально V . Эффект измеряется при вращении ДХ в однородном поле, так чтобы вектор поля оставался в плоскости ДХ. В результате получается зависимость $V_p(\Phi)$ с двумя периодами на $\Delta\Phi = 2\pi$. По данным работы^{/3/} для ДХ типа SBV планарный эффект $-\left[\frac{1}{2}(\alpha_T - \alpha_L) \cdot R_0\right] \frac{B}{T^2 A}$ лежит в пределах $10^{-2} \div 10^{-4}$ и имеет разброс как для разных типов ДХ, так и для ДХ одного типа. По данным Василевской Д.П. (ЛЯП) для одного образца отечественного ДХ типа ДХ-60I в поле 1,7 Т эффект был менее $\sim 2 \cdot 10^{-3}$.

В тех случаях, когда планарный эффект может быть существенным, как например, при измерении сильно неоднородных полей, возможны следующие методы подавления этого эффекта:

1. Калибровка эффекта и внесение соответствующих коррекций в измеренные значения полей.

2. Измерение поля с изменением полярности его (эффект не зависит от полярности поля) с последующим усреднением результатов.

3. Подбор двух ДХ с близким эффектом с последующей установкой их в одном месте и соединением с компенсацией эффекта.

Многие параметры ДХ зависят от температуры. Так, например, для наиболее важных параметров ДХ-60I характерны такие температурные коэффициенты: для чувствительности $\sim 0,01\%/^{\circ}\text{C}$, для сопротивления $\sim 0,08\%/^{\circ}\text{C}$, для напряжения неэквипотенциальности $\sim 1 \text{ мкВ}/^{\circ}\text{C}$, для термо ЭДС спая медь-полупроводник $> 100 \text{ мкВ}/^{\circ}\text{C}$. Эти значения показывают необходимость термостабилизации ДХ с точностью лучше $0,1^{\circ}\text{C}$, чтобы достичь высокой ($\sim 10^{-4}$) точности преобразования ДХ. Для термо ЭДС необходимо в еще большей степени снижать температурный градиент на спае.

Существует ряд способов термостабилизации датчиков. Наиболее распространенным и простым является способ с подогревом датчика. Кроме того, встречаются водяные термостаты или такие экзотические, в которых используется стабильность температуры при переходе вещества (например, парафина) из жидкого в твердое состояние^{/7,14/}.

Иногда температурная коррекция вводится в результаты измерения с помощью ЭВМ^{/18,16/}.

В некоторых случаях измерений полей важно как можно более точно определить центр чувствительной области ДХ и положение его плоскости. Обычно из-за конструктивных особенностей ДХ его центр трудно определить более точно, чем $0,1-0,05 \text{ мм}$ ^{/6,16/}, хотя такая потребность возникает, например, в случае измерения полей с большими градиентами. Кстати, в работе^{/3/} экспериментально установлено, что измерения с ДХ практически не зависят от градиента поля и размеров чувствительной области. Так два ДХ с размерами $1,6 \times 1,6 \text{ мм}^2$ и $0,15 \times 0,15 \text{ мм}^2$ в поле с градиентом $0,1 \text{ Т/см}$ показали в одном положении идентичность поля с точностью 10^{-4} .

Для обеспечения высокой относительной точности измерения распределений полей имеет важное значение точность перемещения пробника с ДХ. Во многих системах привода достигнуты точности до $5 \text{ мк} / 4,5 /$, что обеспечивается либо использованием подходящих прецизионных систем перемещения, например, станков $/3, 16 /$, либо разработкой специальных уникальных систем привода с шаговыми двигателями и пневматическими устройствами $/3 /$.

3. Электронная аппаратура в измерителях с ДХ.

Безусловна важность электронной аппаратуры для достижения высоких точностей и быстродействия при измерениях полей с помощью ДХ. Во-первых, питание ДХ, как правило, от генератора тока, должно стабилизироваться с точностью значительно превышающей требуемую точность измерения поля. Стабильность тока (обычно $100 \div 200 \text{ мА}$) с использованием современных электронных компонент может без особых затруднений доведена до $10^{-4} \div 10^{-5} / 3, 6, 4 /$.

Во-вторых, соответственно высокие требования предъявляются к электронным устройствам обработки и регистрации сигналов с ДХ. Аналоговые мультиплексоры и преобразователи уровня сигналов, применяемые во входных цепях измерительных каналов, должны отличаться высокой стабильностью, а также предельно низкими уровнями приведенного ко входу дрейфа, так как в большинстве случаев измерения проводятся на постоянном токе. В настоящее время эти устройства, как правило, выполняются на интегральных операционных усилителях, в результате чего стабильность коэффициентов передачи, обычно небольших по величине, превышает 10^{-4} , а значения входного дрейфа достигают весьма низких уровней $\sim 0, 1 \div 1, 0 \text{ мкВ}$. В качестве выходного ре-

гистратора наиболее рационально и удобно использовать цифровые вольтметры (ЦВ) /5,7/. Обладая чрезвычайно высоким разрешением и стабильностью, ЦВ, наряду с визуальной индикацией результата, имеют цифровой электрический выход, сигнал с которого легко подать для последующей обработки на различные цифровые преобразователи, в том числе и на ЭВМ. Во многих случаях электронная аппаратура, предшествующая ЭВМ, выполняется в стандарте РАМАК.

Весьма существенным моментом для Холловской методики является необходимость калибровки магнитометров, чтобы обеспечить измерения абсолютных значений магнитных полей, а также повысить относительную точность. При этом в калибровочных графиках или аналитических выражениях учитывается, например, нелинейность основной характеристики ДХ, неточность установки его в пробнике и т.д. Операция калибровки традиционно проводится с помощью ЯМР магнитометров в однородных магнитных полях с точностями до $10^{-5} \div 10^{-6}$. Проблемой в этом вопросе является упрощение и автоматизация этой процедуры с одной стороны, а также эффективное использование результатов калибровки для коррекции данных измерений. Подчас эти операции занимают достаточно много времени, что особенно недопустимо при магнитных измерениях в большом количестве точек. Решению этой проблемы уделяется серьезное внимание в ряде работ /8,9,10/.

К настоящему времени сложилась некая типовая структура холловских магнитных измерительных систем высокого уровня /10,11/. Во-первых, в этой системе обычно имеется несколько датчиков (вплоть до 100) /9/, что значительно упрощает измерения, упрощает систему механического привода, позволяет измерять сразу все составляющие

вектора магнитной индукции и т.д. Далее для сокращения объема электронного оборудования используется аналоговый мультиплексор с одним общим каналом регистрации^{/9/}. Датчики последовательно опрашиваются, а результаты измерения, преобразованные в цифровую форму в ЦВ или АЦП, пропускаются через устройство на основе микропроцессора^{/8/} или через мини ЭВМ^{/10/}. В мини ЭВМ результаты измерения для каждого датчика обрабатываются с учетом различных коррекций (по температуре, по току питания ДХ и отклонениям других параметров) и их калибровочных характеристик. Результаты в единицах магнитного поля выдаются на печать, а также производится простейший анализ измерений. Кроме того, результаты могут быть переданы в большую ЭВМ для дополнительного обсчета и анализа их^{/16/}.

Вводя для калибровки ЯМР магнитметр и управляемое образцовое магнитное поле в указанную типовую систему, разумно упрощается процедура калибровки измерительных каналов. Система работает по специальной калибровочной программе. Результаты калибровки распечатываются на телетайпе (на перфоленте) и заносятся в память системы для последующих коррекций результатов измерений.

Измерительная система с мини ЭВМ, как правило, также управляет и системой привода датчика и регистрирует координаты датчика совместно с результатами измерений на телетайпе^{/8,4,16/}.

В некоторых работах^{/21/} особо отмечается эффективность применения при решении задач магнитометрии микро ЭВМ, которые по размерам при обеспечении достаточного объема памяти не превышают 5-10 станций крейта КАМАК. Система измерения с микро ЭВМ обычно специализирована, она экономична, компактна и функционально завершена без привлечения большой ЭВМ^{/8,11/}.

Кроме измерения стационарных магнитных полей, с ДХ возможно с успехом осуществлять измерения импульсных полей путем регистрации мгновенных значений этих полей в различные моменты времени относительно, например, начала импульса^{/18/}. Здесь возникает дополнительная проблема при измерении — подавление влияния индукционных наводок на измерительные цепи, чтобы обеспечить традиционные для ДХ в стационарных полях точности. Это решается с помощью ряда мер. Во-первых, уменьшается относительный вклад наводок в измеряемый сигнал за счет питания ДХ повышенным на порядок током, что поднимает соответственно его чувствительность. Во-вторых, применяется специальная электронная активная фильтрация сигнала, уменьшающая наводки в полосе до 1 кГц в сотни раз. И наконец, применяются способы обычного пассивного снижения уровня наводок. В результате возможно достичь точности измерения мгновенных (в пределах 1 мкс) значений полей до $4-5 \cdot 10^{-4}$, с возможностью простой абсолютной калибровки по ЯМР.

Иногда при питании магнитных систем недостаточно стабильным током для измерения топографии поля с высокой точностью требуется осуществлять относительные измерения. При этом необходим дополнительный измерительный датчик, который постоянно располагается в к-л точке поля. Результаты измерений подвижными датчиками нормируются по показаниям опорного датчика. Такой прием может значительно (на порядок) улучшить точность измерения топографии поля.^{/9,13/} Подобный эффект имеет место и в случае получения распределения градиента в магнитной системе не по топографии поля, снятой одним датчиком, а когда в пробнике используются два ДХ на известном основании, включенные дифференциально и измеряющие непосред-

редственно градиент. Здесь подавляется влияние нестабильности питания системы и неточности фиксации положения датчика на результаты измерения^{/12/}.

4. Конкретные магнитоизмерительные системы для ускорителей.

В таблице I показаны в кратком виде результаты некоторых работ, опубликованных в последние годы, где представлены магнитоизмерительные системы с наиболее высокими достигнутыми параметрами, которые имеют прямое отношение к ускорительной технике. Эти результаты подтверждают сказанное выше и дают общее представление об уровне современной Холловской магнитоизмерительной аппаратуры.

Большая часть аппаратуры предназначена для измерений дипольных отклоняющих и транспортных магнитов, магнитов для различных ускорителей, выполненных с использованием железа. Как следует из таблицы, разрешение и стабильность измерительных систем составляет 1 Гс. Т.о. для магнитов с железом, где поля $I \div 2$ Т, верхний предел точности измерений соответствует уровню 0,01%. Для более низких полей точности измерений будут также ниже.

В сверхпроводящих магнитных системах, где поля составляют $4 \div 5$ Т, при имеющемся уровне развития Холловской методики, верхний предел точности повысится в 2 раза.

5. Холловские измерители гармонических коэффициентов поля.

Как уже говорилось выше ДХ применяются в основном для снятия топографии поля в магнитах. Для измерения гармонических коэффициентов магнитного поля Холловская методика применялась до сих

№ п/п	№ организации, год.	Диам. поля, погрешн. измер-ия.	Число и тип ДХ, стаб. тока	Тип термомет. Δt °С.	Регистратор сигналов. Обработка результатов.	Привод, ошибка установки	Примеч.	№
1	1	2	3	4	5	6	7	8
1	Англия, Резерфорд Лаб., РЛА 1967	До 2Т, 50Гс/см, 2·10 ⁻⁴	1 FS-34 4·10 ⁻⁵	Изменен. составн. ±0,02°С	ЦВ Дулатса 2022, ±0,01%	Ручной, спец. калибр.	Наблюд. старен. ДХ.	7
2	СССР ИЯФ, Новосибирск, ВЯПП-4 1970	До 2Т 3-5·10 ⁻⁴	12 ДХ-601 Корр. по ЭВМ	t° нагрева корр. ЭВМ	Мультиметр ИЯФ, ЦВ В2-22, ЭВМ Минск 22 ПЛ-20	Моторн. по Z 0,1мм по ф-дат.	Непрер. режим двийж. дат.	18
3	ФРГ КФЗ Карлсруэ 1970	До 5Т, 3Кгс/см 10 ⁻⁴	1	Комнатн. кондицион. 22±0,5°С	АЦП HP2402 ЭВМ TR86 он-лайн дополн. IBM 360/65	Автом., шаг. 3х коорд. Поворот - ручной. ±5мкм по ф-дат.	Привод на возд. подушке	4
4	СССР НИИЭФА 1971	До 2Т ±0,1%	2 X-511, ток управл. по схеме	Погрев. 60±0,5°С	Мост с компенсак. вх. сигн. По калибр. таблицам.		Нес таб. лит. ±1%, относит. измер-я.	13
5	Швейцария, ЦЕРН, SFM, 1972	До 2Т 0,1% ±10Гс Без учета фл. фф-3·10 ⁻⁴	6 через 5,10см, SBV-579, 2·10 ⁻⁵	Погрев. 0,1°С	Мультиметр, ЦВ, 0,01%, 0,1с, 10мкВ ЭВМ, 16бит, 8к; 1,6мкс цикла.	Автомат. по X и Y, шаг. 0,01мм; 0,1град	Учитыв. планар. ффр-кит.	6
6	Швейцария, Цюрих, SIN 1975	До 2Тс град. 10 ⁻⁴	1 SBV-579	Возв. 25±0,1°С	ЦВ. SM215, 1мкВ HP3480D, 10мкВ, 1мс ЭВМ HP2114 он-лайн	Автом., 3 коорд, 2-вращ., шаг. 0,01мм; ±5мкм.	Непрер. двийж. на возд. подушке	5
7	Швейцария ЦЕРН, MSC SC2, 1975	До 2Тс град. ±2Гс	100 SBV-579	25±0,1°С	Мультиметр. HP2323A, 140кан., 40кан/с. ЦВ, 3·10 ⁻⁴ ЭВМ Сименс 301, 16к, 24бит, 16мкс.	Автом. поазимуту 0,13 град/с 0,01 град	Измер. относит. опорного	9

Таблица 1.

8	7	6	5	4	3	2	1
17	Непрер. гвиж. по Ф	Мотор по Ф Ручное по R 0,1 мм по ф-грат.	ЦВ LM1440 Solastron Выброс на ПЛ Обработ. на Минск 32	Подогрев. ± 0,1 °C	1 X211 10-5	До 2Т 10-4	СССР, ОИЯЦ Изобр. цикл. Ц-200 1976
15	Пробод. гармом. анализ	Автомат. по РуР в медиан. плоск R - 0,01 мм Ф - 36"	ЦВ Щ1513, 20мс бур. память АЦП-4096 ЭВМ М220А (ЕС1010) теледиск, графр, дискл.	Двойной подогрев ± 0,5 °C ± 0,1 °C	1 X500 < 10-4	До 2Т с граф. 2.10-4	СССР, ИАЭ Москва Изобр. цикл. 1977
12	Измер. лим. полей 90 10 кГц	Автом. мотор. R, Y, Z. 0,1 мм < 1°	ЦВ TR1652, 10 мкс. Блоки КАМАК, АЦП-1024, 5В, 1 мкс ЭВМ М6000 Т-тайм, магн. лента	Подогрев. 0,1 °C	3 ДХ601 < 10-4	До 2Т с граф. Пост 2.10-4 Лим < 10-3	СССР, ОИЯЦ КУТИ 1977
10	Площ. поля ~ 5 м²	Автом. по Ф-90° По R - 3 полож.	ЦВ Solastron 1490-3; 0,2с ЭВМ Mitsu 15 он-лайн Т-тайм, расчет., дисклей	Подогрев 35° ± 0,1 °C	2,5 по R через 1см SBV-579 S1 < 10-4	До 2Т ± 1 Г	Франция, CERN 1977
3	Объемная десятки м³	Автом., шаг. гвигат. X, Y, Z 0,1 мм по ф-грат.	Мультимикроскоп НР2112 ЦВ. НР2402А ЭВМ НР2100 35к, 16б.ит. Т-тайм, дисклей, магн. лента.	Подогрев 0,1 °C	3 или 12 SBV-579 S1 < 10-4	До 2Т 10-4	Швейцария, ЦЕРН, 1977
16	Для привода механика станка.	Автом., шаг. гвигат. X, Y, Z ± 0,15 мм	ЦВ Solastron 1490-3; 0,2с. КАМАК блок ЭВМ PDP-11.	Корр. по ЭВМ	1	До 2Т с граф. 1 Г	Англия Daresbury Lab. SRS бустер 1977
11	СВ-пр. магн. Ф = 30 см, газор-1,2-10 см	Автом. по Ф, ручн. по R- шаг 0,5 мм 0,01° ± 0,03 мм	Рел. мультимикроскоп АЦП SD 7205, 1 мкс, 20мс, с 0,1% ЭВМ Intel S.B. 80/10, 15к Т-тайм, магн. лента.	Водяной ± 0,1 °C	3 по R через 5 мм SBV-585-S1 < 10-4	До 5Т, 800 Гс/мм ± 0,01% ± 0,1% абсол. 1977	Италия, Милан, УниВ-мет, СВ-пр. циклотр. 1977
8	МК-пр. учн-ты вает калибровку	Автом. по X, Y, шаг. гвигат. По Z - ручн. 0,01 мм по ф-грат.	Мультимикроскоп, АЦП Микропроцессор, ПЛ. ЭВМ IBM 026	Подогрев. 0,1 °C контр. по ЭВМ	3 10-5 контр. по ЭВМ	До 2Т 10-4	Франция, Орсе, LAL 1977

Таблица 1.

пор весьма ограниченно и только в квадрупольных магнитах /19,20/. Это связано, по-видимому, с тем, что эта методика в отличие от методики с индукционными катушками дает не интегральные, а локальные значения гармонических коэффициентов. Для получения же интегральных значений требуется много измерений на длине магнита и их число растет пропорционально его размерам.

Описанная в /20/ система измерения гармонических коэффициентов квадрупольных линз установки TRIUMF (Канада) с помощью вращающегося датчика Холла, применялась для детального исследования небольшого числа прототипов магнитов. Для быстрого же измерения большого числа магнитов использовалась другая измерительная система, на основе катушечной методики. В диполях такая методика может быть также полезна для измерения локальных значений гармонических коэффициентов в каком-либо сечении магнита (например, на его краях) при выборе наилучшей конструкции магнита.

При этом измеряются значения какой-либо компоненты магнитного поля в равноотстоящих по азимуту точках и затем с помощью дискретного Фурье-преобразования находятся гармонические коэффициенты поля. Измерения можно проводить одним вращающимся датчиком или системой датчиков, расположенных неподвижно.

Для компенсации основной компоненты магнитного поля в диполях можно поместить в центр магнита еще один опорный датчик, сигнал которого будет вычитаться из сигналов остальных датчиков. Это позволит повысить точность измерений.

Точность вычисления гармонических коэффициентов зависит от точности измерения магнитного поля в каждой точке, а также от точности измерения координат этих точек. Эта зависимость была

исследована для системы неподвижных датчиков, равномерно расположенных от 0 до 2π . Каждому датчику в пределах выбранной точности случайным образом задавалась погрешность измерения поля и погрешности в координатах. Затем для поля с заданным набором гармонических коэффициентов (в данном случае задавалось 10 первых гармоник) исследовалась зависимость точности их восстановления от точности измерения магнитного поля и координат. Результаты приведены в таблицах 2 (для системы датчиков, измеряющих B_y компоненту поля, рис. 2) и 3 (для системы, измеряющей B_θ рис. 3). В этих таблицах ΔR и $\Delta \theta$ - точности задания R и θ координат датчиков, ρ - отклонение от измерительной системы от магнитной оси, γ - угол между нормалью к плоскости датчика и направлением измеряемой компоненты магнитного поля. ΔA_2 - относительная (по отношению к амплитуде основной гармоники) погрешность восстановления амплитуды квадрупольной (линейной) гармоники магнитного поля, $\Delta \alpha_2$ - точность восстановления её фазы, $\sum \Delta A$ - суммарная относительная погрешность восстановления амплитуд нелинейных ($2 \leq n \leq 10$) гармоник поля, $\Delta \alpha_1$ - точность восстановления фазы дипольной гармоники. В таблице 2 α_1 отсутствует, так как система, измеряющая B_y , не позволяет определить α_1 . Таблицы 2 и 3 определяют требования к измерительной и системе, исходя из требований к точности определения величин α_1, A_2, α_2 и $\sum A_n$. В Табл. 4. приведены абсолютные точности восстановления гармонических коэффициентов.

Из таблиц видно, что система, измеряющая B_θ -компоненту, очень чувствительна к погрешностям угловых координат датчиков и их ориентировки относительно поля. В системе же, измеряющей B_y компоненту, требования к точности установки датчиков значительно ниже. Так

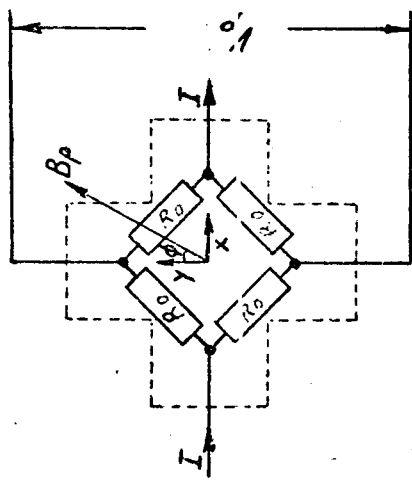


Рис. 1.

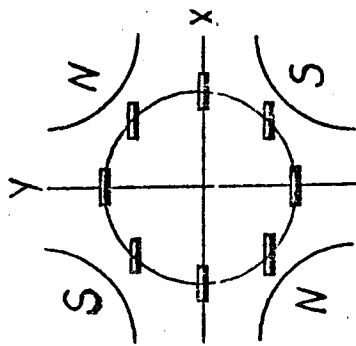


Рис. 2.

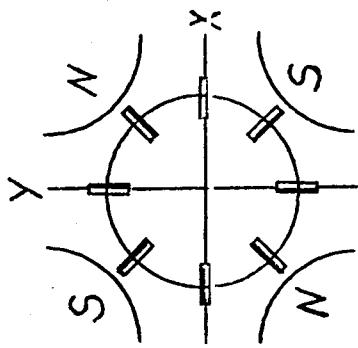


Рис. 3.

Таблица 2

	γ		ρ/R_0		$\Delta B/B$		$\Delta R/R_0$			$\Delta \theta$		
	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}
ΔA_2	$3,5 \cdot 10^{-6}$	10^{-7}	10^{-7}	$6,9 \cdot 10^{-5}$	$3,2 \cdot 10^{-5}$	$8 \cdot 10^{-7}$	$1,1 \cdot 10^{-6}$	$3,6 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-7}$	$2,6 \cdot 10^{-5}$	$9 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-7}$
$\Delta \alpha_2$	$2,7 \cdot 10^{-6}$	$9,4 \cdot 10^{-6}$	$2,8 \cdot 10^{-5}$	$5,6 \cdot 10^{-2}$	$1,6 \cdot 10^{-1}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$5,6 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-5}$	$2,3 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$2,9 \cdot 10^{-1}$	$2,6 \cdot 10^{-5}$
$\Sigma \Delta A_n$	$7,8 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-7}$	10^{-7}	$7,2 \cdot 10^{-5}$	$2,4 \cdot 10^{-1}$	$4 \cdot 10^{-7}$	$1,7 \cdot 10^{-5}$	$3,5 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-7}$	$1,3 \cdot 10^{-5}$	$9 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-7}$

Таблица 3

	γ		P/R_0		$\Delta B/B$		$\Delta R/R_0$		$\Delta \theta$		
	10^2	10^3	10^2	10^3	10^3	10^4	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-4}
$\Delta \alpha_1$	$1,2 \cdot 10^3$	$1,2 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^{-6}$	$6 \cdot 10^{-7}$	$8,5 \cdot 10^4$	$2,5 \cdot 10^5$	$3 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{-8}$	$< 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{-8}$	$3 \cdot 10^{-9}$
ΔA_2	$5,7 \cdot 10^3$	$1,1 \cdot 10^4$	$8,4 \cdot 10^{-6}$	$1,3 \cdot 10^{-5}$	$2,5 \cdot 10^4$	$2,7 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$< 10^{-7}$	$2,7 \cdot 10^{-8}$	$2,4 \cdot 10^{-9}$
$\Delta \varphi_2$	$9,7 \cdot 10^3$	$6,4 \cdot 10^4$	$3,6 \cdot 10^{-6}$	$4,8 \cdot 10^{-6}$	$1,5 \cdot 10^4$	$1,3 \cdot 10^5$	$3,6 \cdot 10^{-6}$	$3,6 \cdot 10^{-5}$	$3,6 \cdot 10^{-5}$	$3,6 \cdot 10^{-7}$	$7,2 \cdot 10^{-9}$
$\Sigma \Delta A_n$	$1 \cdot 10^2$	$8 \cdot 10^3$	$9 \cdot 10^{-6}$	$8 \cdot 10^{-7}$	$9,6 \cdot 10^4$	$9,6 \cdot 10^5$	$9 \cdot 10^{-5}$	$9,9 \cdot 10^{-5}$	$9 \cdot 10^{-7}$	$8 \cdot 10^{-7}$	$9,2 \cdot 10^{-9}$

n	$\frac{A_n}{A_1}$		χ		Pr ₀		$\Delta B/B$		$\Delta R/R_0$		ΔO	
	10^{-2}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-3}
2	0,035	0,0055%	4,7%	0,05%	2,5%	1,1%	0,04%	0,1%	0,9%	0,03%		
3	0,005	0,0006%	0,5%	0,02%	3,3%	0,1%	1,2%	0,05%	0,06%	0,03%		
4	0,009	0,2%	14%	0,4%	14,6%	1,4%	2,5%	1,1%	1,9%	0,05%		
5	0,005	0,02%	0,26%	0,008%	9,8%	0,7%	1,1%	0,08%	0,9%	0,02%		
6	0,009	3,5%	16,4%	0,5%	>50%	2,4%	1,4%	1,9%	2,1%	0,002%		
7	0,004	0,1%	1,1%	0,03%	6,4%	3,7%	2,9%	0,06%	0,4%	0,1%		
8	0,0005	1%	26,7%	0,75%	>100%	6,1%	25%	4,3%	11,9%	0,3%		
9	0,0025	0,1%	1,9%	0,06%	10,8%	4,2%	11,9%	0,1%	2,2%	0,3%		
10	0,0015	3,9%	0,04%	<0,001%	35,7%	11,8%	8,5%	1,7%	6,4%	0,4%		

Таблица 4

требования на точности установки углов γ и φ в такой системе $\sim 10^{-2} \div 10^{-3}$ рад, а на относительные точности установки координат $\frac{\rho}{R_0}$ и $\frac{\Delta R}{R_0} \sim 10^{-2} \div 10^{-3}$. Здесь R_0 - радиус апертуры.

Для сравнения приведем точности установки углов и координат датчиков в /19,20/. Так в /19/ угловая координата датчика измерялась с точностью $\pm 10^{-4}$ рад, а его ориентировка относительно поля с точностью $\pm 3 \cdot 10^{-3}$ рад. Чтобы исключить систематическую ошибку, связанную с неточной ориентацией датчика относительно поля, проводились также измерения с датчиком, повернутым на 180° . В /20/ координаты датчика в плоскости, перпендикулярной оси магнита, определялись с точностью $\pm 0,0025$ мм, а вдоль оси магнита $\sim 0,3$ мм. Угловая ориентация датчика определялась с точностью до $1'$. Как видно из табл.2, такие точности для системы на рис. 2 не требуются. Можно с достаточной точностью определить гармонические коэффициенты и при более умеренных требованиях к измерительной системе.

6. Заключение.

Опыт работы в ФНАЛе /23,22/ показывает целесообразность развития различных методик для измерения сверхпроводящих магнитов. Так, например, Холловская методика использовалась для измерения остаточного поля в центральной области диполя вдоль оси /24/, а также краевого поля и определения эффективной длины магнитов. Кроме того, Холловская методика использовалась для абсолютной привязки измерений с помощью катушек /25/ и для снятия зависимости поля в центре диполя от тока питания магнита.

Измерения же гармонических коэффициентов, медианной плоскости и оси магнитов проводились с помощью различных измерительных индукционных катушек.

ЛИТЕРАТУРА.

1. А.Кобус и др. Датчики Холла и магниторезисторы, М., Энергия, 1971.
2. Ю.В.Афанасьев и др. Магнитометрические преобразователи, приборы, установки, изд. Энергия, Л., 1972.
3. O. Runolfsson, Proc. 6th Int. Conf. on Magn. Techn., Bratislava, 1977.
4. J. Brandes et al., Proc. 3d Int. Conf. on Magn. Techn., Hamburg, 1970, 1472.
5. O. Szavits et al., Proc. 7th Int. Conf. on Cyclotrons, Zurich, 1975, 184.
6. J. Billan et al., Proc. 4th Int. Conf. on Magn. Techn., Brookhaven, 1972, 779.
7. P.A. Reeve et al., Proc. 2d Int. Conf. on Magn. Techn., Oxford, 1967, 693.
8. C. Bazin et al., Proc. 6th Int. Conf. on Magn. Techn., Bratislava, 1977.
9. E. Braunerseuthez et al., Proc. 7th Int. Conf. on Cyclotrons, Zurich, 1975.
10. J.M. Baze et al., Proc. 6th Int. Conf. on Magn. Techn., Bratislava, 1977.
11. E. Acerbi et al., Proc. 6th Int. Conf. on Magn. Techn., Bratislava, 1977.
12. Л.Н.Ахманова и др., Препринт ОИЯИ, Р9-10621, Дубна, 1977.
13. М.П.Васильев и др. ПТЭ № 4, 1971, 210.
14. В.И.Быков, А.Ф.Линев, ПТЭ № 5, 1973, 223.
15. Ю.П.Бузулуков и др. ПТЭ № 3, 1977, 28.
16. M.W. Poole et al., Proc. 6th Int. Conf. on Magn. Techn., Bratislava, 1977.
17. А.К.Евдокимов и др. Сообщение ОИЯИ, № 9-9545, Дубна, 1976.
18. Б.А.Баклаков и др. Препринт ИЯФ 73-70 СОАН СССР, Новосибирск, 1970.
19. V. Jung, Nucl. Instrum. Meth., 98, 1972, 157.
20. P.A. Reeve et al., Nucl. Instrum. Meth., 135, 1976, 459.
21. J. S. Colonias, Abstracts 6th Int. Conf. on Magn. Techn., Bratislava, 1977.
22. R. Yamada et al., FNAL, TM-726, Apr., 1977.
23. R. Yamada et al., Proc. Int. Conf. on Cryogenics, Aug. 1977.
24. R. Yamada et al., IEEE, Trans. on Magnetics, v. MAG-13, n1, Jan. 1977.
25. R. Yamada et al., Proc. 5th Int. Conf. on Magn. Techn., Roma, 1975.

Г. ЯМР магнитометрия.

Ядерный магнитный резонанс (ЯМР) считается классическим методом измерения абсолютных величин магнитных полей^{/1/}. С относительно простыми средствами этот метод обеспечивает абсолютные точности измерения полного вектора поля $\sim 10^{-5} \div 10^{-6}$ /2,3/. Основным преимуществом этой методики является возможность весьма точной регистрации частоты ЯМР, которая непосредственно через ядерные константы связана с измеряемым полем. Например, для протонов в полях до 5 Т частота лежит в диапазоне до ~ 200 МГц.

ЯМР техника часто используется для калибровок дипольных железных магнитов со сравнительно высокой однородностью, определяемой формой полюсных наконечников. Зависимость сигналов ЯМР от степени однородности поля создает трудность при измерении этих полей, а также в сверхпроводящих диполях. В последних достигаются более высокие поля, но они оказываются, как правило, и менее однородными.^{/7/} Для полей выше 2Т обычно в качестве ЯМР образца применяют не протоны, а ядра лития, дейтерия, алюминия, меди и др., у которых в этих полях частота ЯМР ниже. Однако их применение снижает более, чем на порядок величину сигнала ЯМР и тем самым усугубляет проблему получения достаточного для четкой регистрации отношения сигнала ЯМР к шуму в сравнительно неоднородных полях.

Существует ряд практических способов повышения отношения сигнала к шуму. Это способ компенсации градиента поля в объеме образца с помощью специальной магнитной системы^{/3,10/}. Положительное влияние оказывает оптимизация чувствительного объема образца, повышение плотности ядер в образце и выбор соответствующей добавки парамагнитных ионов в жидких образцах. В некоторых случаях применяются оптимальная фильтрация сигнала или система регистрации с накоплением и усреднением результатов измерений^{/7,11/}.

Определенные трудности в ЯМР магнитометрах возникают при удалении датчика от электронных измерительных схем (снижается перекрытие в поддиапазонах, ухудшается чувствительность). Введение части электронной схемы (например, автодина, детектора, входного усилителя) вместе с датчиком в измеряемое поле улучшает указанные характеристики, позволяя достаточно просто дистанционно передавать уже низкочастотные сигналы из входного блока в основной^{/13/}. Правда, на входной блок накладываются требования - элементы схем должны работать в широком диапазоне полей и быть немагнитными.

За последнее десять-пятнадцать лет стало обычным применение в ЯМР магнитометрах полной или частичной автоматизации их работы, чтобы повысить их быстродействие и точность измерения, обеспечить связь с ЭВМ. Сюда относятся различные по принципам и элементам системы автоматизации поиска сигналов ЯМР, слежения частоты в датчике за измеряемым полем, а также системы автоматического измерения частоты ЯМР с представлением результата в единицах магнитного поля^{/3/}.

В сверхпроводящих магнитных системах иногда требуется проводить измерения полей при низких гелиевых температурах^{/4/}. В этом случае для применения обычного ЯМР - магнитометра с жидким образцом необходим антикриостат для нормальной работы датчика. Эта задача для высоких полей также успешно решается применением при низких температурах в качестве образцов порошков меди, натрия, алюминия, что, кроме того, снижает рабочую частоту в более удобный н/ч диапазон.

Несмотря на указанные ограничения ЯМР методики, высокие метрологические возможности её инициируют новые применения в измерениях характеристик в рабочих дипольных магнитах ускорителей. Таким р

показательным примером ^{/2,3/} является использование ЯМР - техники для измерения топографии поля больших дипольных магнитов нового мюонного накопительного кольца в ЦЕРНе. Общая длина магнитов - 44 м, проведены измерения в 250 тыс. точек с точностью $\sim 10^{-6}$.

Усовершенствованный вариант ЯМР магнитометра ^{/3/}, примененного в ЦЕРНе, имеет диапазон измеряемых полей - 1 кГс \div 68 кГс, перекрываемый четырьмя пробниками с H_2O (до 21 кГс) и двумя - с D_2O . Основной блок магнитометра смонтирован в секции *NIM* двойной ширины. В нем содержится ρ -4. генератор (30 \div 90) МГц, внутренний частотомер с индикацией результатов в единицах поля и все остальные электронные схемы. Магнитометр обеспечивает поиск, привязку и слежение за полем, а также ряд других автоматических подстроек режима основной схемы. Модуляция поля в датчике имеет пилообразную форму с частотой 30 Гц и амплитудой до $\sim 10^{-4}$ Визм. К измерительному пробнику возможно прикреплять две печатные катушки для компенсации градиента в объеме образца (до 20 Гс/см).

Другим применением подобного ЯМР магнитометра ^{/7/} является определение зависимости абсолютного значения центрального поля сверхпроводящих диполей "Даблера" в ФНАЛ от тока питания магнитов. В магнитометре для диапазона полей (17 \div 55) КГс использованы ядра лития ($LiCl + CuSO_4$). Размер образцовой ампулы - ϕ 3 мм, $l \approx 5$ мм с коэффициентом заполнения контурной катушки - 1,0. Были проверены ряд модификаций диполей. Наиболее неоднородными оказались полномасштабные (длина 6,6 м) сверхпроводящие диполи серии E22. Для сравнения они имели однородность $\sim 2 \times 10^{-4}$ по образцу ($0,035 \text{ см}^3$) при 20 кГс. Оказалось, что даже для протонного образца

с оптимальным объемом, который располагался в наиболее однородном центральном поле дипольного магнита E22, при величине поля ~ 20 кГс сигнал ЯМР трудно наблюдаем. В связи с этим была дополнительно осуществлена система повышения отношения сигнала к шуму. Первоначально использовался промышленный осциллограф с цифровым управлением фирмы Тектроникс совместно с ЭВМ PDP-II. Они проводили накопление и усреднение сигналов ЯМР, снижая относительный вклад шумов в конечный результат, который представлялся на экране осциллографа. В последнее время эта дорогая и громоздкая система была заменена относительно простой, компактной и дешевой, аналогичной по результатам схемой на основе микропроцессора серии 6800. Усреднение производится по 250 точкам с 8-бит разрешением при 64 сканированиях сигнала. Для одного усредненного измерения требуется 10 сек. В результате отношение сигнала к шуму повышается более, чем в 8 раз. Кроме того, обычно требовались определенные усилия для снижения влияния шума от питания магнита и микрофонного шума. Но даже с использованием всех указанных ухищрений при высоких полях ~ 40 кГс становится трудным наблюдать сигнал от ядер лития при однородностях поля хуже $10^{-3}/\text{см}^3$.

В последние годы в практику магнитных измерений вошла методика ЯМР с применением проточной жидкости, обычно воды^{/8,9/}. В ней ЯМР - магнитометр обычного типа используется как анализатор намагниченности проточной воды. Магнитометр работает в простых условиях с датчиком, помещенным в однородное среднее по величине анализирующее поле вспомогательного магнита. Основной же измерительный датчик^{/9/}, простой по конструкции - тонкая стеклянная трубка (ϕ 2-3 мм) с катушкой на ней из нескольких витков, помещается в изме-

ряемое поле. Предварительно намагниченная вода последовательно проходит сначала через датчик нутации (перемагничивания), а затем через катушки анализатора. Изменение намагниченности проточной воды в датчике нутации происходит при совпадении частоты ρ -4 сигнала, подаваемого в катушку датчика нутации, с частотой протонного резонанса в измеряемом поле внутри катушки нутации. Это изменение регистрируется анализирующим ЯМР - магнитометром. Используемый протонный сигнал дает максимальное отношение сигнала к шуму, датчик нутации очень компактен, а объем нутации может доведен до $\sim 0,002 \text{ см}^3$. Все это допускает неоднородность измеряемого поля, например, до 5%/см, при которой точность измерения лучше 0,05%/9/.

С одним датчиком нутации и соответствующим генератором в.ч. можно измерять поля в широком диапазоне от менее 10^{-4} Т до более 10 Т . Датчик возможно удалять от основной аппаратуры на несколько метров. Процедура регистрации нутации и определение частоты ЯМР несколько сложнее, чем в обычном ЯМР магнитометра, и пока не автоматизирована. За счет этого, отчасти, реально достижимая точность измерения несколько ниже - $10^{-4} - 10^{-5}$. С помощью этой методики проведено ряд измерений в магнитных системах^{9,10/}. В магнитометрии сверхпроводящих диполей эта методика со временем при соответствующей доработке может оказаться весьма полезной.

Рассматривая ЯМР методику с точки зрения потребностей магнитометрии на УНК, следует выделить следующие реальные возможности применения. Во-первых, ЯМР - магнитометр останется основным прибором для абсолютной прецизионной калибровки магнитометрической аппаратуры другого типа (например, холлвских магнитометров) при наличии соответствующих эталонных однородных магнитных полей.

Во-вторых, методика ЯМР в настоящее время позволяет измерять некоторые характеристики сверхпроводящих диполей (Гаусс-амперную зависимость, распределение полей в медианной плоскости). Эти возможности безусловно повысятся при дальнейшем усовершенствовании ЯМР аппаратуры и ее автоматизации.

В-третьих, конкретно учитывая преимущества методики ЯМР с нулевой чувствительностью к неоднородности, малый объем чувствительной области и всего датчика, широкий непрерывный диапазон измеряемых полей, возможность удаления датчика на 2-3 м от прибора), а также дальнейшее усовершенствование соответствующих электронных схем регистрации и автоматизации их работы, реально возможно повысить метрологические характеристики методики для указанных выше и новых применений.

ЛИТЕРАТУРА по ЯМР - методике.

1. А.Леше, Ядерная индукция, ИЛ., Москва, 1963.
2. O. Runolfsson, Proc. 6th Int. Conf. on Magnet Techn. (MT-6), Bratislava, 1977.
3. K. Borez, G. Frémont, CERN EPD/77-19, 1977.
4. J. K. Huebert, J. of Phys. E: Sci. Instrum, V9, 283, 1976.
5. K. Borez, Nucl. Instr. Meth, 143, 203, 1977.
6. K. Borez, F. Lange, Nucl. Instr. Meth, 143, 219, 1977.
7. R. Yamada, et al., Proc. Int. Conf. on Accelerators, Chicago, March 1977.
8. А.И.Жерновой, Г.Д.Латышев, Ядерный магнитный резонанс в проточной жидкости, Атомиздат, 1964.
9. Е.Н.Лысенко, ПТЭ, № 1, 1977, 222.
10. Д.П.Василевская и др., ПТЭ, № 1, 174.
11. С.А.Ивашкевич, Препринт ОИИИ, I3-4045, Дубна, 1968.
12. Ю.Н.Денисов и др. Измерительная техника, № 2, 56, 1968.

Д. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исходя из рассмотренных выше обзорных материалов по магнитометрическим методикам и учитывая достигнутые результаты по созданию и эксплуатации ряда измерительных систем на основе этих методик в ОИИИ и ИФВЭ, можно рекомендовать следующие предложения для обсуждения в качестве перспективных разработок, которые смогут быть использованы для решения задач по магнитным измерениям на УНК.

По холловской методике.

1. Дальнейшее совершенствование основной измерительной холловской аппаратуры, типа ММХ-3 и ММХ-3, с целью повышения точности измерения постоянных и импульсных магнитных полей лучше, чем 10^{-4} и расширению диапазона до ~ 5 Т, автоматизации процесса измерения и связи с ЭВМ.

2. Проведение разработки и создание опытного макета многодатчикового холловского измерителя гармонических составляющих дипольного (квадрупольного) магнитов по сечению апертуры. Измеритель должен обеспечить быстрый анализ поля с автономной микропроцессорной системой обработки и выдачей на печать всех результатов измерения. Возможная относительная точность измерений $\sim 10^{-4}$. Требуется обеспечить высокую точность в положениях датчиков и в процедуре калибровки их.

3. Создание магнитного стенда для проверки и калибровки существующей и проектируемой магнитометрической аппаратуры на основе сверхпроводящего соленоида с однородным ($\sim 10^{-5}$) и теплым полем (ССТОП) до ~ 5 Т с обеспечением его измерительной аппаратурой для автоматизированного проведения калибровок. Диаметр трубы внутри соленоида ~ 10 см.

По методике с индукционными катушками.

1. Разработка и создание опытного макета интегрального гармонического анализатора на основе компенсированной плоской индукционной катушки с непрерывным стабилизированным вращением и жесткой временной привязкой и стробированием. Съём сигналов щеточный или трансформаторный. Включает автономную систему гармонического анализа на основе микропроцессора с выходом на общую ЭВМ. Относительные точности измерения лучше 10^{-4} . Необходимы высокие механические точности и специальная система калибровки.

2. Разработка и создание опытного макета интегрального измерителя гармоник на основе комплекта различных индукционных гармонических катушек с синхронизированным вращением для постоянных полей и с шаговой установкой для пульсирующих полей. Съём сигналов с помощью гальванических связей. Система приема сигналов и обработки их аналогична предыдущей на основе микропроцессора с выходом на общую ЭВМ. Относительные точности определения гармоник поля до 10^{-5} . Необходимы соответственно высокие механические точности и специальная система калибровки.

По-видимому как для измерителей по холловской, так и по методике с индукционными катушками система сбора и обработки данных от измерительных датчиков могут иметь подобную структуру, включающую входные преобразовательные блоки в стандарте КАМАК с автономным микропроцессором с выходами на печать, дисплей и на общую ЭВМ. Т.о. отличия подобных подсистем будет заключаться в различных чувствительных устройствах, входных преобразовательных блоках и программах управления и обработки. Такие подсистемы могут работать в автономном режиме, а при более сложных и длительных измерениях с подключением к общей ЭВМ.

По методике с индукционными катушками.

1. Разработка и создание опытного макета интегрального гармонического анализатора на основе компенсированной плоской индукционной катушки с непрерывным стабилизированным вращением и жесткой временной привязкой и стробированием. Съём сигналов щеточный или трансформаторный. Включает автономную систему гармонического анализа на основе микропроцессора с выходом на общую ЭВМ. Относительные точности измерения лучше 10^{-4} . Необходимы высокие механические точности и специальная система калибровки.

2. Разработка и создание опытного макета интегрального измерителя гармоник на основе комплекта различных индукционных гармонических катушек с синхронизированным вращением для постоянных полей и с шаговой установкой для пульсирующих полей. Съём сигналов с помощью гальванических связей. Система приема сигналов и обработки их аналогична предыдущей на основе микропроцессора с выходом на общую ЭВМ. Относительные точности определения гармоник поля до 10^{-5} . Необходимы соответственно высокие механические точности и специальная система калибровки.

По-видимому как для измерителей по холловской, так и по методике с индукционными катушками система сбора и обработки данных от измерительных датчиков могут иметь подобную структуру, включающую входные преобразовательные блоки в стандарте КАМАК с автономным микропроцессором с выходами на печать, дисплей и на общую ЭВМ. Т.о. отличия подобных подсистем будет заключаться в различных чувствительных устройствах, входных преобразовательных блоках и программах управления и обработки. Такие подсистемы могут работать в автономном режиме, а при более сложных и длительных измерениях с подключением к общей ЭВМ.

Предлагаемые направления работ по совершенствованию ЯМР - методики.

1. Совершенствование традиционной техники ЯМР - магнитометрии с использованием протонов в качестве ЯМР образцов для полей до ~ 2 Т и ядер с более низким γ для полей до ~ 5 Т. Предполагается более высокая степень автоматизации всех функций и узлов магнитометра, связь измерительной системы с ЭВМ или с микропроцессорным устройством для повышения быстродействия регистрации результатов и эффективного управления системой, разработка устройств для повышения отношения сигнала к шуму на новых схемных элементах.

2. Разработка ЯМР магнитометра с автодиным протонным датчиком до полей $\sim 4,5$ Т (до 200 МГц). Использование протонов на высоких полях более, чем на порядок поднимет отношение сигнал-шум. Миниатюризация пробника с автодином на современной элементной базе обеспечит работу до ~ 200 МГц и значительно уменьшит объем пробника, чему будет способствовать введение частотной модуляции. В связи с этим для расширения диапазона измеряемых полей возможно осуществить многодатчиковую систему с автоматическим выбором нужного поддиапазона, что важно для проведения калибровочных работ.

3. Разработка широкодиапазонного ЯМР - измерителя магнитных полей с датчиком нутации в диапазоне полей от $\sim 10^{-4}$ Т до $5 \div 10$ Т. Особо обратить внимание на усовершенствование и автоматизацию процедуры дискриминации резонанса и регистрации значения поля и реальное осуществление преимуществ методики.