

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

5177 '82
1

25/10-82
P9-82-609

М.А.Воеводин, А.Д.Коваленко

О НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЯХ
ПРЕЦИЗИОННЫХ МАГНИТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ
МАЛОАПЕРТУРНЫХ ДИПОЛЕЙ И ЛИНЗ

Направлено в Оргкомитет VIII Всесоюзного совещания
по ускорителям заряженных частиц
/Протвино, октябрь 1982 г./

1982

На VII Совещании по ускорителям в октябре 1980 года сообщалось о созданном в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ автоматизированном стенде на линии с ЭВМ для исследования характеристик магнитных полей, диполей и линз, его основных элементах и возможностях, а также о некоторых результатах измерений образцов сверхпроводящих дипольных магнитов в "теплом" режиме $T = 300\text{K}$, $I = 30 \pm 50\text{ A}$, $B = 0,03 \pm 0,05\text{ T}/1,2$. Результаты, полученные на стенде, убедительно показали необходимость и экономическую целесообразность проведения магнитных измерений СП-магнитов в теплом режиме. Это подтверждено также работами FNAL [3]. Кроме того, потребовалось ввести некоторые усовершенствования, чтобы заведомо достичь требуемых уровней по точности и воспроизводимости результатов измерений.

Методика и общая организация измерений остались прежними. Используется гармонический анализ дискретного массива данных об азимутальном распределении магнитного потока, пронизывающего индукционный преобразователь в форме плоской рамки /одной или нескольких/ с известными координатами проводников, расположенный в апертуре исследуемого магнитного элемента соосно с последним. Питание магнита импульсное, крутизна нарастания тока $\sim 2\text{ kA/c}$, стабилизация $\pm 0,1\%$, диапазон источника тока $0 \pm 60\text{ A}$. Поворот индукционного преобразователя на каждый последующий азимут осуществляется шаговым двигателем через редуктор с коэффициентом редукции $\sim 1:1600$. Время полного оборота $\sim 5\text{ мин}$, количество точек измерения по азимуту N задается оператором, максимальная величина, определяемая в настоящее время размерностью массива в программе обработки $N = 72$, а выбранное рабочее значение $N = 41$.

Сигнал напряжения с индукционного преобразователя U_j после операции интегрирования и мгновенная величина тока питания магнитного элемента в каждом рабочем цикле I_j запоминаются схемами аналоговой памяти и последовательно подаются на вход цифрового вольтметра типа Ц1513, выход которого посредством аппаратуры сопряжения в стандарте КАМАК подключен к ЭВМ. В последнее время на стенде используется ЭВМ MERA-60.

Не рассматривая в данном сообщении вопросов измерения неоднородности полей в апертуре магнитов и линз, поскольку достижение относительных точностей определения высших гармоник на уровне $\sim 5 \cdot 10^{-5}$ и воспроизводимости результатов на уровне $\sim 5 \cdot 10^{-6}$ относительно основной гармоники не потребовало дополнительных мер, мы остановимся на вопросах достижения относительной точности не хуже $1 \cdot 10^{-4}$ при измерении основной гармоники магнитного поля и абсолютной погрешности не более $0,01^\circ$ при определении ее фазы.

Амплитудное значение n -ой гармоники магнитной индукции на радиусе r находится как:

$$B_n(r) = \frac{n \cdot \tau \cdot Q_n}{S_n} \left(\frac{r}{R_1} \right)^{n-1}, \quad /1/$$

где τ - постоянная времени в цепи обратной связи интегратора, S_n - чувствительность преобразователя, Q_n - амплитуда n -ой гармоники напряжения преобразователя, R_1 - радиальная координата центра сечения внешней обмотки преобразователя.

Вид S_n в /1/ зависит от конструкции и типа преобразователя. Для случая одновитковой рамки длиной l , меньшей длины магнита, с проводниками, расположенными на радиусах \bar{R}_2 и \bar{R}_1 ($\bar{R}_2 < \bar{R}_1$):

$$S_n = l \bar{R}_1 [1 - (\bar{R}_2 / \bar{R}_1)^n]. \quad /2/$$

Исходя из приведенных соотношений и формул дискретного преобразования Фурье, можно проанализировать погрешности измерения. Все источники погрешностей можно разделить на три группы: а/ погрешности, определяемые электронной аппаратурой, б/ погрешности, вызываемые влиянием окружающей среды, в/ погрешности, связанные с ошибками в установке азимутальной координаты и изменением радиальной координаты рамки в процессе вращения.

В первую группу дают вклад изменение коэффициента передачи измерительного тракта, температурный дрейф выходного напряжения предусилителя и интегратора, низкочастотные шумы в измерительном канале, изменение напряжения на конденсаторе в блоке аналоговой памяти в режиме хранения информации, нестабильность апертурного времени схемы аналоговой памяти, низкочастотные наводки и термо-ЭДС в соединительных контактах, нелинейность входной характеристики измерительного канала и, наконец, ограниченная точность аналого-цифрового преобразователя.

Для уменьшения аппаратурных погрешностей помимо выполнения общих рекомендаций по схемотехнике, выбору элементов и их монтажу /4,5/ были введены некоторые новые схемные решения. Так, ключи в блоках аналоговой памяти и интегратора выполнены на основе сочетания магнитоуправляемых контактов /реле РЭС-42/ с электронным ключом, использующим комбинацию трех полевых транзисторов /рис.1/. Сопротивление ключа в замкнутом состоянии $\sim 15\text{ Ом}$, в разомкнутом $\sim 10^{13}\text{ Ом}$, время отключения $\sim 0,3\text{ мкс}$, ток утечки по цепям управления практически отсутствует. Отсутствует также зависимость проводимости ключа от величины коммутируемого напряжения.

Кроме того, в канале передачи данных выходного напряжения вольтметра Ц1513 поставлен блок гальванической развязки /БГР/, в результате чего наводка общего вида уменьшена на $\sim 60\text{ дБ}$. Схема БГР /рис.2/ выполнена с использованием полевых транзисторов с изолированным затвором /КП301Б/, управление которыми удачно согласуется с выходным напряжением АЦП вольтметра.

СОВЕТСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
ОИЯИ
ИЗДАНИЕ 1980

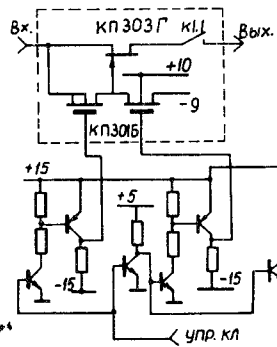
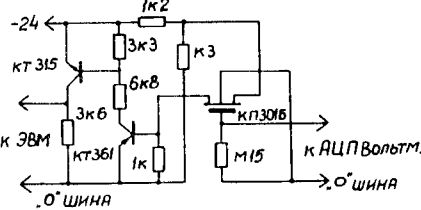


Рис.1. Схема электронного ключа в блоках интегратора и аналоговой памяти.

Рис.2. Принципиальная схема блока гальванической развязки.



Суммарная аппаратная погрешность /без учета нелинейности коэффициента передачи измерительного тракта/ легко определяется экспериментально. Для этого при заторможенном на произвольном азимуте преобразователе считывается N показаний и посредством гармонического анализа определяются постоянная составляющая и гармоники напряжения, которые в данном случае вызваны совокупностью случайных погрешностей аппаратуры. Определенная таким способом максимальная относительная погрешность аппаратуры после усовершенствований составила $\sim 1,2 \cdot 10^{-5}$, а стабильность постоянной составляющей в течение 8 часов работы $\sim 1,5 \cdot 10^{-5}$.

Вторая группа погрешностей вызвана главным образом нестабильностью эффективной площади измерительной рамки вследствие колебаний температуры окружающей среды. При намотке измерительной рамки медным проводом величина этой погрешности в нашем случае становится соизмеримой с аппаратной погрешностью уже при $\Delta T = +1^\circ\text{C}$. Поскольку термостатирования помещения, в котором проводились измерения, не было, то учет этой погрешности осуществлялся путем периодического контроля температуры помещения. Существенного влияния температурных факторов на аппаратуру после ее прогрева /1,5±2 ч/ замечено не было.

Для анализа третьей группы погрешностей ошибку в установке угла представим в следующем виде:

$$\Delta\theta_j = \frac{1}{m} \theta_g + \Delta\theta_1(J, \omega, F) + \Delta\theta_2(r), \quad /3/$$

где θ_g - абсолютная погрешность установки угла шагового двигателя /в нашем случае $\pm 0,5^\circ$ /, m - коэффициент редукции, $\Delta\theta_1$ - ошибка, определяемая наличием механического люфта выходного вала редуктора, прямо пропорциональная моменту инерции J и угловой скорости вращения ω преобразователя, и обратно пропорциональная моменту сил трения F , $\Delta\theta_2$ - ошибка, вызванная нестабильностью положения оси вращения преобразователя.

Если ограничить суммарную относительную погрешность ζ определения основной гармоники величиной $1 \cdot 10^{-4}$, то требования к точно-

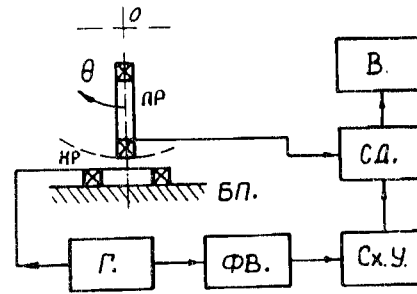


Рис.3. Блок-схема устройства начальной установки индукционного преобразователя; БП - базовая поверхность, Г - генератор, ФВ - фазовращатель, Сх.У - схема управления, СД - синхронный детектор, В - вольтметр, ПР - подвижная рамка, НР - неподвижная рамка.

сти установки угла составят $\Delta\theta_j \leq 3,2 \cdot 10^{-4}$ рад для диполя и $\Delta\theta_j \leq 1,6 \cdot 10^{-4}$ рад для квадрупольных линз. Первое слагаемое в /3/ мало уже при $m \approx 300$. Величины $\Delta\theta_1$, $\Delta\theta_2$ первоначально давали погрешность $\sim 1/3 \div 4 \cdot 10^{-4}$ для диполей и $\sim 1 \cdot 10^{-3}$ для квадрупольных линз. При этом было отмечено, что в большинстве случаев результаты нескольких циклов измерений группируются с разбросом $\sim 1 \cdot 10^{-4}$ вблизи двух более устойчивых значений и что максимальные различия в показаниях при измерении основной гармоники в квадрупольных линзах получаются после перемонтажа блока с индукционным преобразователем. Это свидетельствовало о необходимости в первую очередь уменьшить вклад $\Delta\theta_2$, то есть ошибку за счет радиальных смещений оси преобразователя. Следует заметить, что для уменьшения допусков на смещение оси целесообразно использовать, особенно в квадрупольных линзах, преобразователь, для которого $\partial S_n / \partial r$ была бы минимальной.

Одним из простейших решений является использование преобразователя, состоящего из двух идентичных рамок, симметрично расположенных относительно оси вращения и сдвинутых на 180° в пространстве /6/. Такой преобразователь при согласном включении обмоток измеряет четные гармоники, а при встречном - нечетные. При этом устраняется ошибка, вызванная изменением радиальных координат витков, а относительная ошибка в определении Q_n за счет нестабильности положения оси вращения уменьшается в $2/\pi \Delta\theta_2$ раз. Известны и другие конструкции преобразователей, используемые в аналогичных целях /3,7,8/.

Такие преобразователи в сочетании с повышением точности изготовления и сборки механических узлов /редуктор, подшипники/ позволили достичь точности относительных измерений основной гармоники $\sim 3 \cdot 10^{-5}$ в дипольных магнитах и $\sim 6 \cdot 10^{-5}$ в квадрупольных линзах в наших измерениях.

Если при определении основной гармоники в диполе начальное положение плоскости измерительной рамки совмещено с горизонтом, то по фазе первой гармоники можно определить величину горизонтальной составляющей магнитного поля. Существующее для синхротронов с разделенными функциями ограничение на ее величину $/V_x \leq 5 \cdot 10^{-4} V_z /$ определяет необходимую точность измерения

фазы первой гармоники $\sim 5 \cdot 10^{-4}$ рад. Важным является также определение разброса фаз первой гармоники при измерении серии магнитов. Для решения этой задачи нами разработано и использовано устройство, позволяющее возвращать датчик в исходное положение с точностью до трех угловых секунд $\sim 1,5 \cdot 10^{-5}$ рад/. Устройство содержит две рамки размерами $50 \times 10 \times 3$ мм³, витки которых намотаны на стеклянных основаниях. Одна закреплена на блоке преобразователя, а другая "привязана" к базовой поверхности, на которую помещается исследуемый диполь /рис.3/. Неподвижная рамка возбуждается от генератора с частотой 100 кГц. Наводимый в подвижной рамке сигнал после прохождения синхронного детектора регистрируется индикатором. Параметры подобраны таким образом, что поворот рамки на единичный угол, равный 3,3 угловым секундам, соответствует напряжению 0,1 мВ, регистрируемому вольтметром.

Данные, полученные посредством индукционного преобразователя, концы которого выходят за пределы рассеянного магнитного поля, дают возможность определить интегральные вдоль орбиты частиц значения магнитной индукции, что наиболее существенно для динамики пучка, чем прецизионные измерения абсолютного значения эффективной длины магнитного элемента. В измерениях мы использовали измерительный блок, содержащий короткий и длинный преобразователи. Приведенные выше данные по достигнутым точностям измерений относятся к обоим измерителям.

Таким образом обеспечены прецизионные измерения наиболее важных характеристик магнитного поля дипольных магнитов, имеющих размеры апертуры 55×52 мм² и квадрупольных линз с апертурой 32×64 мм², физической длиной 420 и 150 мм соответственно, на уровне поля порядка 0,03 Т и градиента $\sim 2,5$ Т/м.

ЛИТЕРАТУРА

1. Воеводин М.А. и др. В сб.: Труды VII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. ОИЯИ, Дубна, 1981, т.2, с.290.
2. Алфеев В.С. и др. Там же, т.1, с.290.
3. Fisk H.E. et al. IEEE Trans. on Magnetics, 1981, v.MAG-17, No.1, p.420.
4. Алексеенко А.Г., Колумбет Е.А., Стародуб Г.И. Применение прецизионных аналоговых интегральных схем. "Радио и связь", М., 1981, с.222.
5. Отт Г. Методы подавления шумов и помех в электронных системах. "Мир", М., 1979, с.317.
6. Воеводин М.А., Коваленко А.Д. Авт.свид. №711505 от 25.1.80 г. Бюлл.ОИЯИ, №3, 1980 г, с.201.
7. Wake M. et al. Cryogenics, 1981, p.341-344.
8. Воблый П.Д. и др. В сб.: Труды VI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. ОИЯИ, Дубна, 1979, т.1, с.203.

Рукопись поступила в издательский отдел
6 августа 1982 года.

Воеводин М.А., Коваленко А.Д. P9-82-609
О некоторых особенностях прецизионных магнитных измерений малоапертурных диполей и линз

Рассмотрены вопросы достижения относительной точности не хуже $1 \cdot 10^{-4}$ при измерении основной гармоники магнитного поля и абсолютной погрешности не более $0,01^\circ$ при определении ее фазы в сверхпроводящих дипольных магнитах и квадрупольных линзах в режиме измерений при комнатных температурах. Проанализированы факторы, вносящие погрешности, изложены некоторые способы их уменьшения, экспериментально проверенные в серии рабочих измерений и позволившие достичь заданных уровней точности. Кратко описана методика и организации измерений.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1982

Voevodin M.A., Kovalenko A.D. P9-82-609
On Some Special Properties of Precision Magnetic Measurements of Small Aperture Dipoles and Lenses

Some problems of achievement of relative accuracy not worse than $1 \cdot 10^{-4}$ at measuring the main harmonic of magnetic field and absolute error not more than 0.01° at the determination of its phase in superconducting dipole magnets and quadrupole lenses for room temperature measurements are considered. The factors which initiate errors are analysed, some ways of their diminishing checked experimentally in a set of measurements are described. Measurement techniques are briefly described too.

The investigation has been performed at the Laboratory of High Energies, JINR.

Preprint of the Joint Institute

Перевод О.С.Виноградовой