

К-562

9-81-687

КОВАЛЕНКО

Александр Дмитриевич

РАЗВИТИЕ МЕТОДИКИ
И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ РЕШЕНИЕ
НЕКОТОРЫХ ВОПРОСОВ
ДИАГНОСТИКИ ПУЧКОВ И МАГНИТОМЕТРИИ
НА УСКОРИТЕЛЯХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Специальность 01.04.13 - электрофизика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Дубна 1981

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель
доктор технических наук

Л. П. Зиновьев.

Официальные оппоненты:
доктор физико-математических наук
кандидат технических наук

Э. А. Мяз

П. Т. Шипляников

Ведущее научно-исследовательское учреждение: Физический институт АН СССР им. П. Н. Лебедева (Москва).

Защита диссертации состоится " " 1981 года
в " " часов на заседании Специализированного совета Д-047.01.02
при Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна, Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЛВЭ ОИЯИ.

Автореферат разослан " " 1981 года.

Ученый секретарь
Специализированного совета

М. Ф. Лихачев

Актуальность проблемы. Прогресс науки, изучающей строение вещества, требует постоянного развития своей экспериментальной базы — сооружения новых и совершенствования действующих ускорителей заряженных частиц высоких энергий. Синхрофазотрон на энергию протонов 10 ГэВ, являющийся одной из основных базовых установок Объединенного института ядерных исследований, благодаря постоянному совершенствованию обеспечивает проведение исследований в области современной физики элементарных частиц.

Принципиально важным этапом в развитии синхрофазотрона явилось осуществление режима ускорения легких ядер до энергий $\sim 4,5$ ГэВ/буклон, что обеспечило уникальные возможности для исследований с релятивистскими ядрами^{*/}.

Выполнение в прошедшем пятилетии экспериментальных, теоретических и методических исследований ускорительного комплекса и усовершенствование ряда его систем позволили поднять интенсивность ускоренного пучка протонов до уровня $4,5 \cdot 10^{12}$ р/цикл; обеспечить эксплуатационные уровни интенсивности ускоренных дейтронов $\sim 2 \cdot 10^{11}$ d/цикл, α -частиц $\sim 1 \cdot 10^{10}$ α /цикл, ядер углерода $\sim 1 \cdot 10^6$ ядер/цикл, получить и использовать в физических экспериментах пучки релятивистских ядер азота, кислорода, неона^{жж/}.

Возможность постановки на пучках синхрофазотрона уникальных физических экспериментов и большой интерес в мире к исследованиям в области релятивистской ядерной физики определяют необходимость максимально эффективного использования этого ускорительного комплекса и его дальнейшего развития.

Цель работы состояла в совершенствовании методики и создании средств оперативной диагностики пучков инжекционного комплекса синхрофазотрона ОИЯИ и прецизионной магнитометрии мультипольных магнитов с тем, чтобы расширить возможности для изучения динамики пучков,

^{*/} А. М. Балдин. ОИЯИ, 8309, Дубна, 1974.

^{жж/} Ю. Д. Безногих и др. В кн.: Труды УГ-го Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, ОИЯИ, 1979, т. II, с. 136.

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
БИБЛИОТЕКА

оперативно оптимизировать процесс инжекции, обеспечить мониторинговые низкоинтенсивные пучки ядер без их разрушения и провести исследование образцов сверхпроводящих мультипольных магнитов на уровне возбуждения, допускаемом без криостатирования.

Новизна работы. Теоретически обоснована и экспериментально проверена возможность использования электростатических сигнальных электродов в виде набора узких ламелей для измерения поперечных размеров пучков заряженных частиц. В практике диагностики пучков линейных резонансных ускорителей протонов и ядер использованы тороидальные резонаторы. На их основе создана система контроля энергетического спектра и измерения вариации средней энергии пучков протонов и дейтронов, инжектируемых в синхрофазотрон. Предложены и экспериментально проверены две новые модификации высокочувствительных ионизационных мониторов интенсивности.

Получены удобные соотношения для расчета чувствительности к гармоникам магнитного поля некоторых типов индукционных преобразователей с произвольными размерами поперечного сечения обмоток. Предложена и реализована новая методика, повышающая точность определения чувствительности индукционных преобразователей.

По теме диссертации получено три авторских свидетельства на изобретения.

Практическая ценность. Созданы и испытаны на пучках ускорителя новые диагностические приборы и измерительные системы. Накоплен опыт их эксплуатации.

Проведены исследования параметров магнитных полей серии сверхпроводящих дипольных магнитов на уровне индукции (0,025+0,05 Т) и достигнута точности относительных измерений эффективной длины магнитов и неоднородности поля на уровне лучших мировых достижений в области магнитометрии.

Методические результаты и экспериментально проверенные приборы и устройства могут быть использованы при оснащении средствами диагностики и магнитометрии других ускорительных комплексов.

Апробация и публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в работах [1, 17] и докладывались на У1-ом и УП-ом Всесоюзных совещаниях по ускорителям заряженных частиц (Дубна, октябрь, 1978 г., 1980 г.), на II-ой Всесоюзной конференции "Методы и средства измерения параметров магнитного поля" (Ленинград, ноябрь 1980 г.), на семинаре в ИФВЭ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. Общий объем – 138 страниц, включая 20 страниц иллюстраций (39 рисунков), 3 таблицы и библиографический список литературы. на II страницах (74 наименования).

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении сформулированы постановка, актуальность задачи и направления совершенствования методики и средств диагностики пучков инжекционного комплекса синхрофазотрона. Отмечены основные требования и возникающие трудности в реализации поставленных задач. Отмечена актуальность работ по развитию методики и созданию базы для прецизионной магнитометрии мультипольных сверхпроводящих магнитов.

В первой главе рассмотрены вопросы методики и разработки устройств диагностики пучков для оптимизации процесса инжекции в синхрофазотрон при высоких уровнях интенсивности.

В первом параграфе приведены основные параметры инжектора и условия инжекции пучка, сформулированы задача измерения радиального размера $2a_z$ пучка в камере синхрофазотрона и задача оперативного контроля энергетического спектра и измерения величины модуляции средней энергии пучков на тракте инжекции.

Второй параграф главы посвящен измерению радиальных размеров пучков в камере синхрофазотрона на первых этапах ускорения. После обсуждения выбора метода, исходя из конкретных условий, рассмотрена задача о распределении в пространстве плотности заряда, индуцированного плоским пучком с вертикальным размером $2h \ll 2a_z$ и находящимся посередине между двумя заземленными металлическими плоскостями, расположенными на расстоянии b друг от друга [1]. Для случая равномерной плотности заряда пучка по поперечной координате x ($\rho = \text{const}$), а также для распределений вида $\rho \sim (ch^m a_z^* - ch^m \xi)$ и $\rho \sim (ch a_z^* - ch \xi)^n$, ($m, n = 1, 2$; $a_z^* = \frac{2}{b} a_z$, $0 < \xi \leq a_z^*$) эффективная радиальная ширина пучка $(2a_z)_{\text{эф}}$, т.е. размер, в пределах которого сосредоточено не менее 90% полного заряда, для достаточно широких пучков ($\frac{a_z}{b} \geq 1, 2$) оказывается численно с точностью (5+7)% равной полуширине нормированного распределения плотности индуцированного заряда вблизи заземленных плоскостей.

Макет измерительной системы и результаты его испытаний с имитатором пучка и в рабочих условиях на пучках протонов и дейтронов [2] описаны в заключительном разделе параграфа.

В третьем и четвертом параграфах главы изложены вопросы, связанные с осуществлением оперативного контроля энергетического спектра и вариации средней энергии пучков, инжектируемых в синхрофазотрон.

Приведены примеры использования в диагностических целях на линейных ускорителях электронов и ионов резонаторных преобразователей. На линейных ускорителях протонов или ионов для уменьшения габаритов датчика при сохранении основных его преимуществ удобно использовать тороидальные резонаторы^{3/}. Рассмотрение основных модификаций тороидальных резонаторов с учетом таких требований как обеспечение стабильности характеристик, высокой чувствительности, компактности и технологичности привело к выбору симметричного тороидального резонатора с прямоугольным сечением и габаритными размерами: диаметры тора — 340 мм и 270 мм (наружный и внутренний, соответственно), диаметр отверстия для пролета пучка — 110 мм, продольные размеры — 80 мм в индуктивной части и ~1,2 мм в емкостной. При этом резонансная длина волны составляет 2,07 м. Полость резонатора (Рис. 1) отделена от вакуумируемого объема. Чувствительность преобразователей в рабочих условиях ~ 0,7 В/мА. Длительная эксплуатация датчиков показала высокую стабильность их характеристик.

Три резонатора, условно обозначенные как РД-01, РД-02, РД-03, объединены в измерительную систему. Резонатор РД-01 установлен на расстоянии ~1 м от вакуумного кожуха ЛУ-20, РД-02 на расстоянии $L_1 \approx 6,20$ м от РД-01, а расстояние между РД-02 и РД-03 $L_2 \approx 22,8$ м. Между РД-02 и РД-03 на расстоянии $L_3 \approx 19,6$ м находятся выравниватель и модулятор энергии. Резонаторы РД-02 и РД-03 контролируют качество настройки систем линейного ускорителя; по амплитуде и форме огибающей сигнала с РД-03 настраивается также оптимальный режим работы выравнивателя энергии. Определение средней скорости сгустков пучка линейного ускорителя может быть осуществлено резонаторами РД-01 и РД-02. Для измерения модуляции средней энергии пучка

Рис. 1. Резонаторный датчик. 1 — корпус резонатора, 2 — защитный кожух, 3 — керамическая труба, 4 — медные экраны, 5 — вакуумные уплотнения, 6 — петля связи, 7 — механизм грубой подстройки частоты, 8 — инопровод.

инжекционного комплекса используется сигнал с РД-03, а в качестве опорного — сигнал ВЧ-напряжения линейного ускорителя и сигнал с РД-02. Пределы измерения модуляции энергии +1%.

В заключительном разделе изложена методика настройки инжекционного комплекса по показаниям системы из трех резонаторных преобразователей. Проведенные сеансы измерений показали однозначность связи показаний данной измерительной системы и оптимальной настройки пучка.

Вторая глава посвящена вопросам создания приборов для бесконтактной диагностики низкоинтенсивных пучков ядер.

В первом параграфе изложена постановка задачи, даны основы ионизационного метода диагностики, использующего регистрацию вторичных частиц, образовавшихся в результате ионизации молекул остаточного газа движущимся пучком, отмечены преимущества и недостатки метода.

Второй параграф содержит краткий обзор известных диагностических устройств, основанных на методе ионизации; отмечено, что используются различные способы извлечения вторичных частиц из области их образования и различные способы детектирования, причем носителями информации являются как вторичные ионы, так и вторичные электроны. Применительно к поставленной задаче выбрана схема прибора, в которой используется регистрация вторичных электронов с помощью фотоэлектронного умножителя (ФЭУ).

В третьем параграфе описан ионизационный монитор, разработанный для тракта инъекции. Оценивается влияние электрического поля монитора на первичный пучок, предложено^{5/} использовать вместо плоских электродов цилиндрические, концентричные с пучком, азимутально симметричное поле которых не приводит к поперечным смещениям первичного пучка как целого. Дано описание изготовленного образца монитора (Рис. 2) и результаты его испытаний на стенде и на пучках ядер углерода и α -частиц,

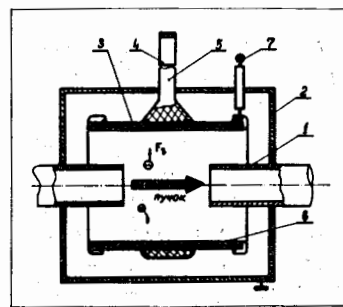


Рис. 2. Ионизационный монитор с азимутально симметричным электрическим полем. 1 — заземленные электроды, 2 — вакуумный кожух, 3 — коллектор вторичных электронов, 4 — ФЭУ, 5 — световод, 6 — экран коллектора, 7 — высоковольтный ввод.

которые показали, что такой прибор может быть использован для диагностики пучков ядер ($Z \geq 6$) с токами порядка единиц микроампера при давлении остаточного газа в области прибора $\sim 10^{-6}$ Торр.

В четвертом параграфе описан монитор пучков, циркулирующих в камере синхрофазотрона. Одной из трудностей диагностики являются большие размеры вакуумной камеры синхрофазотрона (~2000x400 мм).

Было предложено^{6/} использовать с целью упрощения прибора фокусирующие свойства неоднородного в пространстве электрического поля, проникающего в область движения пучка через отверстие в электроде (заземленном или находящемся под низким потенциалом), расположенном между пучком и высокопотенциальным коллектором вторичных частиц. Рассчитано

распределение электрического поля для ряда моделей, выбраны основные параметры конструкции монитора (Рис. 3). В заключительном разделе приведены результаты испытаний и описаны режимы работы монитора на ускорителе. Первый же сеанс испытаний монитора оказался успешным^{/7/}.

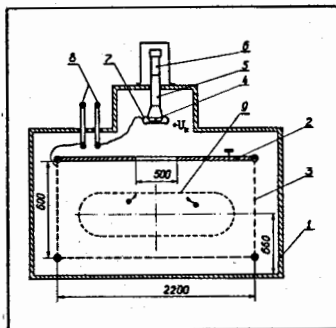


Рис. 3. Ионизационный монитор циркулирующих пучков. 1 - корпус прямоугольного промежутка синхрофазотрона, 2 - заземленный электрод, 3 - сетка, 4 - коллектор, 5 - световод, 6 - ФЭУ, 7 - окранный электрод коллектора, 8 - высоковольтные вводы.

Был осуществлен непрерывный контроль интенсивности пучка ядер углерода, начиная с момента его инъекции в камеру синхрофазотрона. На рис. 4 показаны сигнал с ионизационного монитора (верхний луч) и сигнал с "бетатронной мишени" (коллекторного датчика, установленного на 600 мм внутри от радиуса равновесной орбиты синхрофазотрона) в режиме с включенной ускоряющей станцией. Инжектировалось $\sim 10^8$ ядер, уровень вакуума в области монитора $\sim 2,8 \cdot 10^{-6}$ Торр, потенциал коллектора ~ 30 КВ. Можно наблюдать потери пучка и оценить коэффициент захвата в режим ускорения.

Дальнейшие исследования показали^{/8/}, что порог чувствительности составляет при измерении формы импульса величину порядка 10^7 зарядов, а в режиме интегрирования - $3 \cdot 10^5$ зарядов. Проведены исследования

работы монитора на пучках протонов и дейтронов^{/9/}, при этом осуществлялось ослабление светового потока посредством установки темных пленок с калиброванным ослаблением между световодом и ФЭУ, а также уменьшение напряжения питания ФЭУ.

Более чем трехлетняя эксплуатация монитора на синхрофазотроне показала высокую надежность и устойчивость режимов работы этого диагностического устройства и обеспечила получение новой информации о динамике пучков в камере синхрофазотрона.

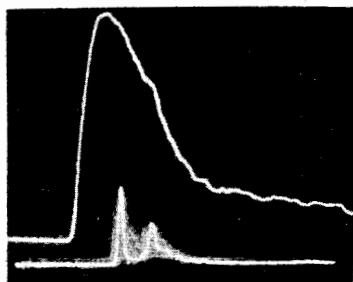


Рис. 4. Изменение интенсивности пучка ядер углерода в камере синхрофазотрона при включении ускоряющего напряжения /верхний луч/. Скорость развертки 250 мкс/дел, масштаб по вертикали - 2 В/дел.

В третьей главе излагаются вопросы методики и практической реализации оперативной прецизионной магнитометрии на основе гармонического анализа с использованием индукционных преобразователей. Кратко изложены основные магнитометрические задачи и способы их решения. Даны основы использования метода гармонического анализа применительно к исследованию плоских магнитных полей. Рассмотрены вопросы выбора оптимальных параметров и типов индукционных преобразователей, методика определения их чувствительности к гармоническим составляющим магнитного поля, анализируются возможные источники погрешностей измерения и способы их уменьшения с целью достижения требуемых точностей при низких уровнях полей, описаны алгоритмы обработки экспериментальных данных и программное обеспечение. Приведены методические результаты, полученные при исследовании серии сверхпроводящих дипольных магнитов типа "оконная рама" на уровне индукции магнитного поля основной гармонике $0,025 \pm 0,05$ Т.

Магнитные системы современных синхротронов строятся на основе мультипольных магнитов, главным образом дипольных и квадрупольных, а также секstupольных и октупольных. При создании новых образцов магнитов и при их серийном изготовлении возникает целый ряд магнитометрических задач, решение которых необходимо для получения информации о соответствии характеристик формируемых ими полей заданным. Наиболее эффективно решить такие задачи, как определение с точностью $\sim 10^{-4}$ величины относительной неоднородности магнитного поля в апертуре магнита, определение эффективной длины, амплитуды основной гармоник поля и особенно относительного разброса этих величин серии магнитов можно, используя метод измерений, основанный на гармоническом анализе данных о величине и азимутальном распределении магнитного поля на фиксированном расстоянии от продольной оси магнита, получаемых с индукционных преобразователей величины магнитного поля в электрический сигнал.

Первые практические применения методики были связаны с исследованием квадрупольных линз^{*/}.

Эффективность подобных измерительных систем особенно проявилась при исследовании образцов сверхпроводящих мультипольных магнитов.

Компоненты магнитной индукции плоского магнитного поля в цилиндрической системе координат ζ, φ, z , продольная ось (z) которой совпадает с продольной осью магнита, могут быть выражены как:

*/ Dayton I.E. et al. Rev. Sci. Instrum., 1954, v. 25, No 5, p. 485.
Греков Н.Н. и др. ПТЭ, 1956, №2, с. 29

$$B_z(z, \varphi) = -\mu_0 \sum_{n=1}^{\infty} n z^{n-1} (a_n \cos n\varphi + b_n \sin n\varphi)$$

$$B_\varphi(z, \varphi) = -\mu_0 \sum_{n=1}^{\infty} n z^{n-1} (-a_n \sin n\varphi + b_n \cos n\varphi)$$

и, следовательно, определив экспериментально достаточное количество гармонических коэффициентов a_n, b_n , имеющих смысл производных компонент индукции B_x, B_y при $z=0$, можно определить B_z, B_φ .

Условия азимутальной симметрии в мультипольных магнитах приводят к тому, что в их гармоническом спектре присутствуют гармоники только с $n=p(2k+1)$, где p - число пар полюсов магнита, $k=0, 1, \dots$ и, кроме того, $a_n=0$. Гармоника, соответствующая $k=0$, является основной и существенно превосходящей по амплитуде все остальные. Погрешности изготовления приводят к появлению в гармоническом спектре реального магнита и запрещенных условиями симметрии гармоник, что обуславливает необходимость определения с заданной точностью всех гармоник, вплоть до некоторой наивысшей^{10/}.

Наибольшее распространение в практике экспериментального исследования мультипольных магнитов нашли индукционные преобразователи, содержащие одну или несколько обмоток в виде плоских рамок.

В стационарных магнитных полях для возбуждения сигнала используют либо непрерывное вращение преобразователя, либо последовательный ступенчатый его поворот относительно продольной оси; при импульсном питании магнита достаточно устанавливать в паузе новое угловое положение преобразователя.

В случае непрерывного вращения преобразователя с угловой скоростью ω :

$$a_n = \frac{U_{bn}}{n\omega S_n}; \quad b_n = -\frac{U_{an}}{n\omega S_n};$$

для систем с интегрированием выходного сигнала с преобразователя при импульсном питании магнита:

$$a_n = \frac{\tau U_{an}}{S_n}; \quad b_n = \frac{\tau U_{bn}}{S_n},$$

где n - номер гармоники, S_n - чувствительность преобразователя к гармоникам магнитного поля, τ - постоянная времени интегратора, U_{an}, U_{bn} - амплитуды гармонических составляющих напряжения преобразователя, рассчитываемые по данным измерений на основании дискретного преобразования Фурье.

В рамках поставленной задачи - проведение экспериментальных исследований мультипольных магнитов с малой апертурой (30+35 мм) на низких уровнях полей (0,025+0,055)Т большое значение имеет повышение точности определения коэффициентов S_n , величины которых зависят от геометрических размеров, конструктивных особенностей и номера гармоники. Эти величины для отдельных типов индукционных преобразователей были рассчитаны в работах ряда авторов.

В совместной работе автора и М.А.Воеводина^{11/} проведена классификация основных типов индукционных преобразователей в приближении обмоток бесконечно малого сечения, исследованы условия компенсации чувствительности к выбранной гармонике и зависимость S_n от погрешностей изготовления и монтажа.

Необходимость повышения амплитуды наводимой в преобразователе э.д.с. приводит к изготовлению обмоток с большим числом витков, так что размеры их поперечного сечения оказываются не пренебрежимо малыми по сравнению с размерами апертуры магнита и при расчете чувствительности реальных преобразователей это необходимо учитывать. Исходя из общего выражения для чувствительности "толстого" преобразователя (Рис. 5), приведенного в работе Уисса^{12/}

$$S_n^* = 2\lambda \ell n \int_{-A}^A \int_{-B}^B \int_{R_1-\xi}^{R_2+\xi} (x^2 + \eta^2)^{\frac{n-1}{2}} \cos[(n-1) \arctg \eta/x] dx d\eta d\xi,$$

(λ - плотность витков обмотки, ℓ - продольная длина преобразователя), в работе^{12/} получено и исследовано аналитическое выражение в квадратурах для расчета чувствительности таких преобразователей. Показа-

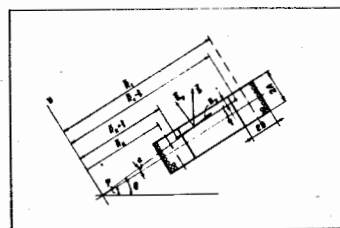


Рис. 5. Модель для расчета чувствительности индукционного преобразователя с "толстой" обмоткой.

^{12/} Уисс С. Proc. V-th Int. Conf. on Magnet Techn., Roma, 1975, p. 231.

но, что линейный рост чувствительности преобразователя с увеличением количества витков в обмотках ($\lambda = \text{const}$) для высоких гармоник достаточно быстро нарушается. Для повышения чувствительности примерно в два раза предложено^{/13/} на одном каркасе располагать две идентичных группы обмоток, сдвинутых друг относительно друга на угол 180° и измерение четных гармоник производить, например, при согласном включении групп, а нечетных – при встречном.

Практически достижимая точность определения гармонических составляющих магнитного поля зависит от способа их измерения, погрешностей определения S_n , точности измерения выходного напряжения преобразователя и установки азимутальной координаты, биений и смещений оси преобразователя относительно оси симметрии магнитного поля, количества азимутов, на которых производятся измерения. Анализ этих вопросов дан в четвертом параграфе главы.

Для повышения точности определения чувствительности преобразователя к гармоникам магнитного поля можно использовать мультипольную магнитную меру – устройство, генерирующее отдельные гармоники магнитного поля с известными амплитудами и фазами. Один из примеров такого устройства, состоящего из 120 проводников, равнорасположенных по образующим цилиндра радиуса C и объединяемых в соответствующие группы с чередующимся направлением тока, описан и исследован^{/14/}.

На практике возможности калибровки могут быть ограничены только малыми n , если радиальный размер обмотки преобразователя \bar{R}_i существенно меньше C . В этом случае предложено^{/15/} определять величины расчетным путем, но использовать данные о радиальных координатах центров сечений обмоток преобразователей (\bar{R}_i), уточненные по результатам калибровки в образцовых дипольном B_{01} и квадрупольном B_{02} полях. При этом эффективная радиальная ширина i -той обмотки преобразователя, чувствительного к азимутальной компоненте поля, будет:

$$\bar{d}_i = \left(\frac{\tau U_{01}}{\omega e} \right)_i \cdot \frac{1}{B_{01}}$$

а

$$\bar{R}_i = \frac{1}{2} \bar{d}_i + \frac{B_{01}}{B_{02}} \left(\frac{U_{02}}{U_{01}} \right)_i \cdot C, \text{ где:}$$

ω – число витков, U_{01}, U_{02} – амплитуды сигналов первой и второй гармоник напряжения отдельной обмотки преобразователя.

Погрешности измерения амплитуды выходного напряжения преобразователя ΔU_i , степень компенсации его чувствительности к основной

гармонике и погрешность установки азимута $\Delta \varphi_i$ на каждом шаге определяют достижимую точность определения гармонических составляющих выходного напряжения преобразователя.

Если в структуре магнитного поля присутствуют гармоники с номерами, большими, чем $N/2$ (N – количество азимутов, на которых производятся измерения), то полученный спектр будет искажен. Результаты анализа экспериментальных данных при $N = 72; 36; 24; 12$ показали, что минимальным для дипольного магнита можно считать $N = 36$.

Оценка влияния смещения и биений оси преобразователя показывает, что n -ая гармоника поля при наличии k -ой гармоники биений вала дает вклад в гармоники с номерами $n \pm k$.

В последнем параграфе главы изложены вопросы организации в ЛВЭ ОИЯИ автоматизированного магнитометрического стенда на линии с ЭВМ ЕС-1010^{/16/} и приведены экспериментальные результаты по исследованию сверхпроводящих дипольных магнитов типа "оконная рама", имеющих размеры апертуры 55×52 мм и продольный размер ~ 420 мм^{*/} в "теплом" варианте^{/17/}.

Исследуемый магнит запитывается импульсным током с крутизной ~ 2 кА/с. Мгновенная величина тока возбуждения определяется с относительной погрешностью не более $2 \cdot 10^{-4}$. Измерение выходного сигнала преобразователя осуществляется цифровым вольтметром ШИ513. Предусмотрен канал предварительного усиления ($g \approx 40$) сигнала индукционного преобразователя до интегрирования. Исходная информация включает четыре массива данных, измеренных длинным $\ell_g = (595, 0 \pm 0, 2)$ мм и коротким $\ell_k = (181, 6 \pm 0, 2)$ мм преобразователями без компенсации ($\mathcal{A}(1), K(1)$) и с компенсацией чувствительности к первой гармонике ($\mathcal{A}(k), K(k)$). Программа приема обработки и представления информации предусматривает работу в режиме диалога оператор-ЭВМ и вывод результатов на цифровую печать, графопостроитель и графический дисплей.

Поперечное сечение блока индукционных преобразователей показано на рис. 6. Число витков в длинных обмотках $w_g = 250$, в коротких – $w_k = 300$.

Определение чувствительности преобразователей к гармоникам магнитного поля до $n < 7$ проводилось в мультипольной магнитной мере^{/14/}, а для $n \geq 7$ на основании изложенной выше методики^{/15/}, при этом погрешность $\delta \bar{R}_i / \bar{R}_i \leq 0,53\%$, что примерно в три раза меньше погрешностей, получаемых при определении \bar{R}_i с помощью механических измерительных приспособлений. Степень компенсации чувствительности к пер-

*/Аверичев С.А. и др. ОИЯИ, Р8-11700, Дубна, 1978.

вой гармонике составила ~ 300 и ~ 500 для короткого и длинного преобразователей, соответственно.

Воспроизводимость амплитуд гармоник относительно основной $(3+4) \cdot 10^{-6}$ для короткого и не хуже $8 \cdot 10^{-6}$ для длинного преобразователя. Точность определения суммарной относительной неоднородности на радиусе, соответствующем $0,71$ полной апертуры с учетом всех источников погрешностей $\pm 1,71 \cdot 10^{-4}$. Эффективная длина магнита определена с точностью $\pm (3+4) \cdot 10^{-4}$.

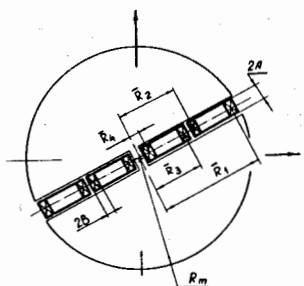


Рис. 6. Поперечное сечение блока индукционных преобразователей.

Время цикла измерения с учетом обработки и представления результатов — 10 минут.

В заключении сформулированы основные итоги работы.

I. Теоретически обоснована и экспериментально проверена методика использования электростатических сигнальных электродов в виде набора узких ламелей для измерения поперечных размеров пучков частиц.

2. Разработан, исследован и впервые для диагностики пучков линейного резонансного ускорителя протонов и ядер использован тороидальный резонатор.

3. Разработана и экспериментально проверена система контроля энергетического спектра и измерения вариации средней энергии пучков заряженных частиц на основе тороидальных резонаторов; отработана методика оперативного контроля качества настройки систем инжекционного комплекса синхрофазотрона ОИЯИ.

4. Предложен и реализован практически на тракте инжекции в синхрофазотрон новый тип высокочувствительного ионизационного монитора интенсивности, обеспечивающего минимальное отклонение пучка заряженных частиц от продольной оси. Получено авторское свидетельство.

5. Создана система контроля интенсивности пучков, циркулирующих в камере синхрофазотрона, с порогом чувствительности $\sim 10^{-7} / z^2$ частиц на основе ионизационного монитора новой модификации. Получено авторское свидетельство.

6. Теоретически исследованы характеристики основных типов индукционных преобразователей магнитного поля в электрический сигнал, получены удобные соотношения для расчета чувствительности к гармоникам

магнитного поля некоторых типов преобразователей с "толстой" обмоткой.

7. Рассчитано и экспериментально проверено устройство, формирующее заданные гармоники магнитного поля, для калибровки гармонических индукционных преобразователей.

8. Предложена и реализована новая методика, повышающая точность определения чувствительности индукционных преобразователей к гармоникам магнитного поля.

9. Исследованы факторы, вносящие погрешности при экспериментальном определении неоднородностей магнитных полей мультипольных магнитов, методом гармонического анализа с использованием индукционных преобразователей.

10. Создано программное обеспечение для обработки экспериментальных данных по определению эффективной длины, амплитуды основной гармоники и относительной неоднородности поля мультипольных магнитов.

11. Проведены исследования параметров магнитных полей серии сверхпроводящих магнитов типа "оконная рама" на уровне индукции $0,025 + 0,05$ Т: при этом эффективная длина магнитов определена с точностью $\pm (3+4) \cdot 10^{-4}$, амплитуды гармонических составляющих поля на радиусе $0,71$ полной апертуры с относительной погрешностью не более $3 \cdot 10^{-5}$, амплитуда основной гармоники с точностью $(1,5+2) \cdot 10^{-3}$.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах /1-17/:

1. Воеводин М.А., Коваленко А.Д. О дополнительных возможностях измерения параметров пучка заряженных частиц индукционными электродами. Часть I. Методика и расчет. ОИЯИ, 9-9989, Дубна, 1976.

2. Воеводин М.А., Коваленко А.Д., Романов Ю.И. О дополнительных возможностях измерения параметров пучка заряженных частиц индукционными электродами. Часть II. Аппаратура и эксперимент. ОИЯИ, 9-10000, Дубна, 1976.

3. Воеводин М.А., Коваленко А.Д., Павлов П.П., Попов В.А. Резонаторный датчик параметров пучков заряженных частиц. ПТЭ, 1979, №1, с. 32-35.

4. Блинников Н.Н.,... Коваленко А.Д. и др. Синхрофазотрон ОИЯИ. Работа и совершенствование (IV квартал 1978 г.). ОИЯИ, 9-12409, Дубна, 1979.

5. Воеводин М.А., Коваленко А.Д., Ларин А.А. Авторское свидетельство СССР №714545. Бюлл. ОИПОТЗ, 1980, №5.

6. Воеводин М.А., Коваленко А.Д. Авторское свидетельство СССР №745293. Бюлл. ОИПОТЗ, 1980, №24.

7. Вадеев В.П., ..., Коваленко А.Д. и др. Синхрофазотрон ОИЯИ. Работа и совершенствование (II квартал 1978 г.). ОИЯИ, 9-11990, Дубна, 1978.
8. Безногих Ю.Д., Воеводин М.А., Зиновьев Л.П., Коваленко А.Д. Новые диагностические устройства инжекционного комплекса синхрофазотрона ОИЯИ. В кн.: Труды VI-го Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. ОИЯИ, т. II, с. 143-146, Дубна, 1979.
9. Булдаковский В.Н., ..., Коваленко А.Д. и др. Синхрофазотрон ОИЯИ. Работа и совершенствование (III квартал 1978 г.). ОИЯИ, 9-12198, Дубна, 1979.
10. Воеводин М.А., Коваленко А.Д. Исследование двумерных магнитных полей методом гармонического анализа. I. Основы метода. ОИЯИ, P9-12233, Дубна, 1979.
11. Воеводин М.А., Коваленко А.Д. Исследование двумерных магнитных полей методом гармонического анализа. 2. Измерительные катушки. ОИЯИ, P9-12378, Дубна, 1979.
12. Воеводин М.А., Коваленко А.Д. О расчете чувствительности "толстых" индукционных катушек. ОИЯИ, P9-80-393, Дубна, 1980.
13. Воеводин М.А., Коваленко А.Д. Авторское свидетельство СССР №711505. Бюлл. ОИПОТЗ, 1980, №3.
14. Воеводин М.А., Коваленко А.Д., Коруков Н.А., Тихомиров Ю.И. Мультипольная магнитная мера для калибровки гармонических индукционных датчиков магнитного поля. ПТЭ, 1981, №1, с. 215-217.
15. Воеводин М.А., Коваленко А.Д. Исследование двумерных магнитных полей методом гармонического анализа. 3. Определение чувствительности к магнитному полю индукционных катушек. ОИЯИ, P9-80-432, Дубна, 1980.
16. Воеводин М.А., ..., Коваленко А.Д. и др. Стенд для прецизионных измерений на линии с ЭВМ ЕС-1010 магнитных характеристик диполей и линз методом гармонического анализа. В кн.: Труды VII-го Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. ОИЯИ, т. II, с. 290-293, Дубна, 1981.
17. Алфеев В.С., ..., Коваленко А.Д. и др. Получение полей высокой однородности в магнитах типа "оконная рама". В кн.: Труды VII-го Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. ОИЯИ, т. I, с. 360-363, Дубна, 1981.