

B-63

9-82-708

ВОЕВОДИН

Михаил Александрович

РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ АППАРАТУРЫ  
ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ПУЧКА, МАГНИТОМЕТРИИ  
И КОРРЕКЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ  
СИНХРОФАЗОТРОНА ОИЯИ

Специальность: 01.04.13 - электрофизика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий Объединённого института ядерных исследований

Научный руководитель:  
доктор технических наук,  
старший научный сотрудник

ЗИНОВЬЕВ  
Леонид Петрович

Официальные оппоненты:  
доктор физико-математических наук,  
профессор

ГОЛЬДИН  
Лев Лазаревич

доктор технических наук,  
старший научный сотрудник

МАТОРА  
Иван Максимович

Ведущее научно-исследовательское учреждение:  
Институт физики высоких энергий, Протвино, Московской обл.

Защита диссертации состоится " \_ " \_\_\_\_\_ 1982 года  
в \_\_\_\_\_ часов на заседании Специализированного совета Д-047.01.02  
при Лаборатории высоких энергий Объединённого института ядерных  
исследований, г. Дубна, Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЛВЭ ОИЯИ.

Автореферат разослан " \_ " \_\_\_\_\_ 1982 года.

Учёный секретарь специализированного  
совета

М. Ф. Лихачёв

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Современные циклические резонансные ускорители с постоянной во времени равновесной орбитой и изменяющимся ведущим магнитным полем являются уникальными физическими установками, с помощью которых осуществляются многочисленные исследования в области ядерной физики и физики элементарных частиц. Синхрофазотрон на энергии протонов 10 ГэВ, успешно запущенный в 1957 г., является одним из таких ускорителей и в настоящее время входит в число основных базовых установок Объединённого института ядерных исследований.

Новым этапом в развитии синхрофазотрона явилось ускорение на нём лёгких ядер до энергий 4,5 ГэВ/нуклон, что вывело его в лидирующую группу ускорителей аналогичного класса и послужило началом экспериментальных исследований в новом научном направлении — релятивистской ядерной физике\*. Возможность постановки на пучках синхрофазотрона уникальных физических экспериментов и большой интерес в мире к исследованию в области релятивистской ядерной физики определяют актуальность работ, направленных на дальнейшее развитие и максимально эффективное использование этого ускорителя.

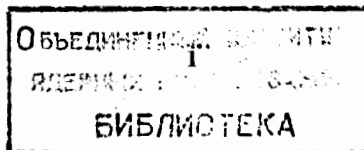
Цель работы состояла в разработке и создании комплекса диагностической аппаратуры для исследования пучков протонов и ядер, инжектируемых в синхрофазотрон; экспериментальном исследовании динамики пучков на начальном этапе ускорения, выяснении причин потерь частиц и оптимизации инжекции; проведении комплекса работ, связанных с изучением и коррекцией магнитного поля синхрофазотрона, направленных на повышение интенсивности ускоряемых частиц, создании магнитометрической аппаратуры для прецизионных измерений характеристик магнитного поля малоапертурных сверхпроводящих мультипольных магнитов в "тёплом" режиме.

Новизна работы. Развита методика измерения энергетических характеристик инжектируемых в камеру синхрофазотрона частиц с использованием короткой инжекции и анализа формы "бетатронного" импульса.

Получены соотношения для расчета коррекции показателя неоднородности магнитного поля синхрофазотрона и рассчитаны оптимальные соотношения токов для регулирования секступольной составляющей магнитного поля с учётом координат корректирующих проводников, находящихся вблизи полюсов магнита.

Показана и экспериментально подтверждена целесообразность ис-

\* Балдин А.М. Вестник АН СССР №8, 1981, с.85.



пользования новых в технике магнитных измерений гальваномагниторекомбинационных (ГМР) преобразователей в целях создания простых и надежных многоканальных магнитометров, обладающих высокими метрологическими параметрами.

Решен комплекс вопросов, относящихся к разработке и созданию автоматизированных систем измерения магнитного поля синхрофазотрона и магнитных полей диполей, квадрупольных и мультипольных линз, применяемых в настоящее время при сооружении синхротронных ускорителей и каналов транспортировки пучков заряженных частиц.

Предложены и использованы две новые конструкции высокочувствительных индукционных датчиков для измерения параметров магнитного поля, защищенные авторскими свидетельствами.

Впервые в большом объеме получены экспериментальные результаты исследования магнитного поля синхрофазотрона. Измерения проводились без пребывания людей в радиационной зоне и магнитном поле ускорителя.

Практическая ценность. Создан ряд устройств и измерительных систем, с помощью которых выполнены экспериментальные исследования динамики частиц и ведущего магнитного поля синхрофазотрона, позволившие совместно с усовершенствованиями ускорительного комплекса существенно увеличить интенсивность ускоряемых пучков.

Комплекс разработанной измерительной аппаратуры, работающий в автоматизированном режиме на линии с ЭВМ, позволил провести исследования характеристик магнитных полей сверхпроводящих диполей и линз в "тёплом" режиме на уровне лучших мировых достижений в области магнитометрии.

Аппаратурная база созданных систем, методика их построения и опыт эксплуатации могут быть использованы как на действующих ускорителях синхротронного типа, так и при создании новых.

Апробация работы и публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в работах /1 - 28/ и докладывались на У- м, УІ- м и УІІ- м Всесоюзных совещаниях по ускорителям заряженных частиц (Дубна, октябрь, 1976 г., 1978 г., 1980 г.), на Всесоюзной научно-технической конференции "Теория, методы и средства измерения магнитных величин" (Ленинград, май 1977 г.) и на ІІ- й Всесоюзной конференции "Методы и средства измерения параметров магнитного поля" (Ленинград, ноябрь, 1980 г.)

Структура диссертации отвечает избранной теме и содержанию. Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. Содержит 112 страниц текста, 27 страниц иллюстраций, 6 таблиц и библиографический список литературы из 139 наименований. Общий объем работы - 164 страницы.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана общая характеристика работы, обоснована её актуальность. Сформулирована цель работы и кратко изложено то новое, что, по мнению автора, вносится в решение поставленной задачи.

В первой главе рассматриваются вопросы разработки и создания диагностической аппаратуры, предназначенной для исследования основных параметров пучков заряженных частиц, инжектируемых в камеру синхрофазотрона, таких, как величина и форма импульсного тока, поперечный эмиттанс и энергетические характеристики. Анализируются известные методы измерения указанных параметров, обоснованы наиболее рациональные методические приёмы и оптимальные конструктивные и схемные решения при создании диагностических устройств.

Рассматриваются особенности построения аппаратуры для измерения величины и формы ионного тока инжекционного тракта с помощью магнитоиндукционных датчиков (МИД). Перечисляются источники помех и указаны пути уменьшения электромагнитных наводок на тракт измерительного канала /1, 2/. Группа МИД разработанной типовой конструкции на протяжении 10 лет успешно эксплуатируется на инжекционном участке синхрофазотрона и обеспечивает оперативный режим настройки многих узлов инжектора. С помощью разработанной автором электронной аппаратуры МИД позволяет бесконтактным способом измерять величину ионного тока в диапазоне (0,1 ... 50) мА при длительности импульсного тока 600 мкс с погрешностью 5%. Представленный расчет МИД в наглядной форме определяет связь выходного напряжения с током при различных электрических и геометрических характеристиках датчика; позволяет оценить погрешности измерения, обусловленные ограниченной частотой передачи измерительного канала. Показаны преимущества интегрирующего режима работы МИД в условиях воздействия на него импульсных помех.

Описана разработанная автором система, позволяющая исследовать поперечный эмиттанс пучка на выходе линейного ускорителя (ЛУ-20). Дан анализ методическим погрешностям измерения.

Важное значение в целях оптимальной настройки режима инжекции частиц в камеру ускорителя имеет информация об энергетических характеристиках инжектируемых частиц. Измерение и настройка мгновенного и интегрального энергетических спектров являются важнейшими процедурами для достижения максимальной интенсивности ускоренных пучков, поэтому измерительная аппаратура должна работать в широком диапазоне интенсивностей частиц (от  $5 \cdot 10^6$  при ускорении ядер неона до  $1 \cdot 10^{14}$  при ускорении протонов), должна быть оперативной и простой

в эксплуатации. Этим требованиям в значительной степени отвечает метод, основанный на анализе формы "бетатронного" импульса. Развитие метода и его реализация рассмотрены в последнем разделе главы. Краткое существо этого метода состоит в следующем. Если в кольцо синхрофазотрона осуществить короткую инжекцию (например, длительностью  $(10 + 50)$  мкс), тогда при определенном соотношении энергии частиц и величины ведущего магнитного поля (МП) мгновенные орбиты частиц пройдут вблизи инфлектора. В растущем МП частицы после завершения многооборотной циркуляции в момент времени  $t_1$  (рис. I) начнут взаимодействовать с мишенью, находящейся вблизи внутренней стенки камеры ускорителя ("бетатронная" мишень). Длительность импульса ( $\Delta T$ ) определяет время полного взаимодействия частиц с мишенью и при определенных условиях характеризует величину мгновенного энергетического спектра инжектируемых частиц.

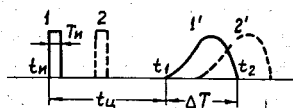


Рис. I. Временная диаграмма циркуляции ( $t_u$ ) и взаимодействия ( $\Delta T$ ) инжектируемого пучка длительностью  $T_i$  с внутренней мишенью в квазибетатронном режиме.

Кривая I' соответствует току мишени при инжекции в момент времени I; кривая 2' - инжекции в момент времени 2.

Расчеты, приведенные в диссертации, показывают, что зависимость ширины энергетического спектра от  $\Delta T$  имеет практически линейный характер. Оптимальная настройка закона изменения средней энергии инжектируемых частиц ( $W_{cp}$ ), которая предполагает прохождение мгновенных орбит вблизи инфлектора на протяжении всей длительности инжекции, производится изменением фазы в.ч. напряжения выравнивателя энергии и контролируется по длительности циркуляции пучка ( $t_u$ ) в камере ускорителя. При правильной настройке  $W_{cp}$  время ( $t_u + \Delta T$ ) не должно уменьшаться при смещении начала короткой инжекции.

Вторая глава посвящена работам, направленным на совершенствование синхрофазотрона в части повышения интенсивности ускоряемых пучков. При вводе в эксплуатацию линейных ускорителей ЛУ-9м (1971 г.) и ЛУ-20 (1974 г.) было отмечено, что увеличение интенсивности на синхрофазотроне не имеет прямой зависимости от числа инжектируемых частиц и, более того, начиная с некоторого количества частиц прекращается рост конечной интенсивности. В связи с этим максимальная интенсивность синхрофазотрона при работе ЛУ-9м составляла  $(1 + 1,2) \cdot 10^{11}$  р/цикл, а для ЛУ-20 -  $2,5 \cdot 10^{11}$  р/цикл (кривая I рис.2)

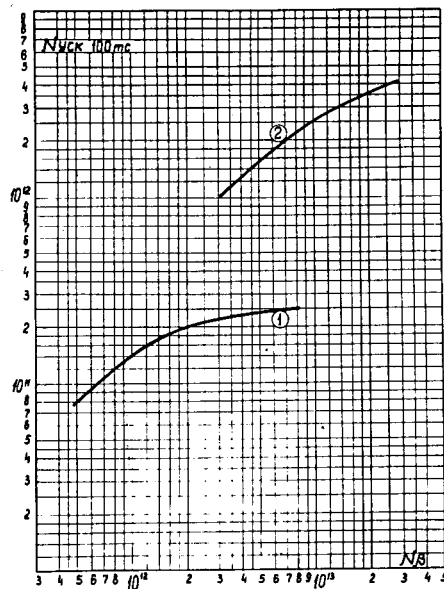


Рис. 2. Интенсивность ускоренного пучка протонов в зависимости от количества частиц в квазибетатронном режиме для различных этапов развития ускорительного комплекса синхрофазотрона.

(1 - при запуске инжектора ЛУ-20; 2 - при увеличении тока инжекции с модернизированной системой коррекции "H" и управлении работой модулятора энергии с помощью функционального генератора).

Измерение числа частиц, выбывших из ускорения в первые  $(10 + 20)$  мс с помощью 4 мишеней, расположенных с четырех сторон камеры ускорителя, показали, что после формирования ускоряемого ступка частиц потери происходят в вертикальном направлении и вызваны неустойчивостью рабочей точки на диаграмме частот бетатронных колебаний. Экспериментальные исследования <sup>3/</sup> указывали на то, что смещение рабочей точки при конечной интенсивности более  $2,5 \cdot 10^{11}$  (для ЛУ-20) вызвано действием пространственного заряда, при котором рабочая точка ускорителя попадала в полосы нелинейных резонансов. Согласно расчетам работы <sup>4/</sup>, начальный сдвиг частот бетатронных колебаний для центральной области пучка составляет  $\Delta \nu_z = -1,2 \cdot 10^{-2}$  и  $\Delta \nu_x = -6 \cdot 10^{-2}$  при числе захваченных частиц  $N = 3 \cdot 10^{12}$ . В этой же работе дана оценка ширин и силы резонансов. Анализ результатов показывает, что основную роль за возбуждение резонансов играют производные  $\partial \nu / \partial z$  и их азимутальные гармоники.

Важным обстоятельством является и то, что ширина резонансов существенно зависит от амплитуд радиальных бетатронных колебаний ( $A_r$ ). Поэтому основные работы по повышению интенсивности на этом этапе были направлены на модернизацию системы коррекции показателя неоднородности магнитного поля "H" и улучшение режима инжекции

с целью максимального заполнения рабочей области камеры ускорителя частицами с минимальными  $\alpha_{\tau}$ . Кроме того, как отмечалось в работе <sup>\*/</sup>, при многооборотной инжекции в растущее МП ускорителя, равномерное заполнение продольного аксептанса синхрофазотрона частицами с малыми  $\alpha_{\tau}$  увеличивает в 1,5 раза коэффициент захвата в синхронный режим ускорения.

С целью повышения эффективности работы модулятора энергии, обеспечивающего равномерное заполнение продольного аксептанса частицами с  $\alpha_{\tau \min}$ , разработан и создан аналоговый функциональный генератор, выходное напряжение которого изменяется по программируемому закону <sup>/5/</sup>.

Для осуществления пространственно-временной оперативной коррекции "n" разработан и создан унифицированный источник тока <sup>/6/</sup>. В схеме источника в качестве управляемых регуляторов тока нагрузки использованы тиристоры, что позволило повысить надежность работы источника и уменьшить его габариты. На базе использования 32 источников тока осуществлена модернизация существовавшей системы коррекции "n" и азимутальной асимметрии МП <sup>/7/</sup>. Новая система, находящаяся около 8 лет в эксплуатации, показала высокую надежность работы и позволяет из зала управления ускорителем вводить необходимые коррекции.

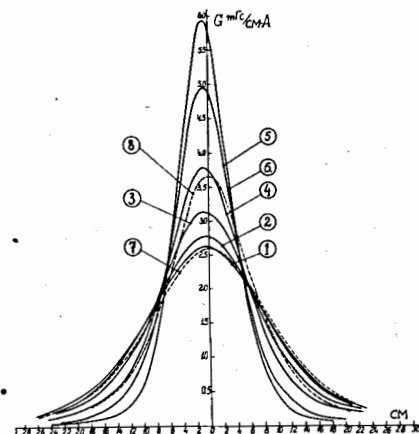
Разработана и создана система оперативного измерения азимутальной неоднородности МП синхрофазотрона <sup>/8/</sup>. Для определения оптимальных соотношений величин токов в проводниках, находящихся вблизи поверхности полюсов магнита и регулирующих квадратичную нелинейность МП, произведен расчет токов с учетом наклона полюсов магнита и реальных координат проводников <sup>/9/</sup>. Приведены аналитические выражения, связывающие величину градиента МП с током в корректирующих проводниках. Численный расчет градиента МП, создаваемого рабочей обмоткой, хорошо согласуется с экспериментальными результатами (рис.3).

Расчетным путем исследована рабочая область камеры ускорителя, ограниченная допустимыми искажениями в распределении  $n = f(r)$ , вносимыми центральной группой корректирующих проводников (рис.4) <sup>/9/</sup>. Проведение вышеуказанных работ позволило уменьшить ширины полос нелинейных резонансов и смещение рабочей точки на диаграмме частот (за счет уменьшения плотности пространственного заряда), что обеспечило ускорение пучков больших интенсивностей (кривая 2 рис.2). Дальнейшее выполнение экспериментальных, теоретических и методических исследований синхрофазотрона и совершенствование ряда его сис-

\* Г.Грин, Э.Курант. Ускорители (под ред. Б.Н.Яблокова). М., "Наука", 1962, с.292.

Рис. 3. Экспериментальные (1...6) и расчетные (7, 8) величины градиента МП, создаваемые проводником с током в зазоре магнита в зависимости от расстояния до проводника.

(1, 7 -  $z = 0,75$  см; 2 -  $z = 2,75$  см; 3 -  $z = 4,75$  см; 4, 8 -  $z = 6,75$  см; 5 -  $z = 8,75$  см; 6 -  $z = 9,75$  см, где  $z$  - высота, отсчитываемая от медианной поверхности ускорителя.



тем <sup>/10,11/</sup> позволили поднять максимальную интенсивность ускоренных пучков до следующих уровней: протоны -  $4,7 \cdot 10^{12}$ , дейтоны -  $4,1 \cdot 10^{11}$ , ядра гелия -  $5,0 \cdot 10^{10}$  и ядра углерода -  $3 \cdot 10^6$  за цикл работы ускорителя.

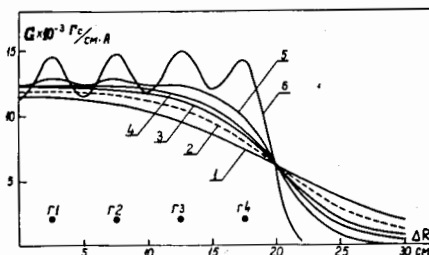


Рис. 4. Расчетные зависимости градиента МП для различных  $z$  при последовательном включении проводников Г1...Г4.

(1 -  $z = 0,75$  см; 2 -  $z = 6,75$  см; 3 -  $z = 8,75$  см; 4 -  $z = 9,75$  см; 5 -  $z = 11$  см; 6 -  $z = 13$  см).

В третьей главе рассматриваются вопросы создания приборов и автоматизированных систем для измерения магнитных полей синхротронов. Кратко изложены основные магнитометрические задачи и способы их решения, приводится анализ основных погрешностей измерения МП с использованием импульсных индукционных магнитометров, сформулированы требования к элементам измерительной аппаратуры <sup>/12/</sup>.

В работах по совершенствованию синхрофазотрона и повышению интенсивности ускоренных пучков важное значение имеет исследование топографии МП во всей рабочей области кольца ускорителя и во всем диапазоне магнитных индукций. Выполнить большой объем намеченных измерений без наличия автоматизированной системы, исключающей присутствие

обслуживающего персонала в опасной зоне (радиационном и магнитном поле ускорителя) и сокращающей общее время измерений, до последнего времени не представлялось возможным.

Небольшая величина градиента МП синхрофазотрона, которая составляет всего лишь  $5,35 \cdot 10^{-4}$  Т/м при поле инжекции  $B_{и} = 0,023$  Т, создает определённые трудности в организации автоматизированных измерений "н" и определяет необходимость исследования остаточного МП ускорителя. Для измерения остаточного МП, которое находится в пределах  $(-0,6 \dots +5) \cdot 10^{-3}$  Т, впервые в СССР создан многоканальный магнитометр с использованием нового типа преобразователя величины МП в электрический сигнал. Преобразователь, названный гальваномагниторекомбинационным (ГМР)<sup>\*</sup>, имеет ряд существенных преимуществ и надо ожидать, что магнитометры на его основе в ближайшее время найдут широкое применение в измерительной технике, а отдельные узлы разработанного прибора могут быть рекомендованы при создании простых и надёжных промышленных тесламетров. На рис.5 представлена структурная схема созданного автором многоканального магнитометра /13 - 15/.

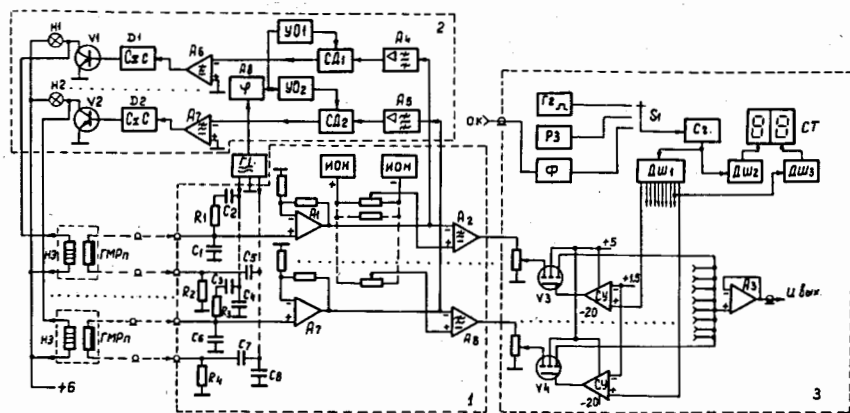


Рис. 5. Структурная схема десятиканального магнитометра с ГМР преобразователями.

УО - усилитель ограничитель, СД - синхронный детектор, СхС - компаратор, Г - генератор, ИОН - источник опорного напряжения, НЭ - нагревательный элемент, Сч - счетчик, РЗ - ручной запуск, Дш - дешифратор, СТ - световое табло, СУ - схема управления.

\* Пикус Г.Е., Сорокин О.В. ЖТФ, 1957. Том XXVII №11 с.2647 и Левитас И.С., Пожела Ю.К. Литовский физический сб. VII №2, 1967,387

Особенностью его является реализация режима работы, при котором для измерения постоянных магнитных полей ГМР преобразователь возбуждается переменным напряжением, а информация о величине МП и о температуре датчика, необходимой для его термостабилизации, осуществляется путем разделения выходного сигнала датчика по частотным признакам /14,15/. При этом использование сравнительно простых схем преобразования сигнала с датчика позволяет, тем не менее, получить высокую чувствительность к МП ( $150$  В/Т), хорошую помехозащищенность и высокую термостабильность датчика.

Для преодоления трудностей, возникающих при автоматизации измерений небольшой величины динамического градиента МП синхрофазотрона, автором предложена и реализована новая конструкция индукционного преобразователя /16/, которая обладает высокой чувствительностью ( $4,5 \cdot 10^2$  В/Т при постоянной времени цепи обратной связи интегратора  $T_{ос} = 10^{-2}$  с) и высокой избирательностью (80 дБ) к градиентной компоненте МП (рис.6).

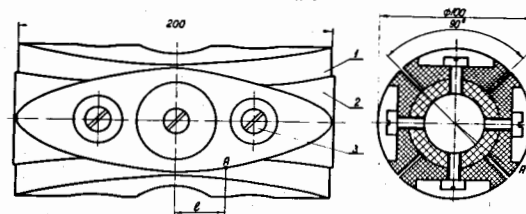


Рис. 6. Конструкция избирательного градиентного датчика (1-клиновидная секция, 2-каркас датчика, 3-винт).

Витки измерительной обмотки занимают всю боковую поверхность клиновидной секции и образуют контур, описываемый гармоническим законом.

Десять таких датчиков и датчик для измерения абсолютной величины МП образуют единый узел (блок преобразователей), который устанавливается на платформе, обеспечивающей перемещение блока внутри камеры ускорителя. На рис.7 представлена структурная схема созданной многоканальной измерительной системы измерения динамического показателя неоднородности МП, работающей на линии с ЭВМ ЕС-1010 /17/. Число каналов - II, точность измерения абсолютной величины "н"  $\leq 1\%$  в диапазоне МП от  $0,023$  Т до  $1,2$  Т. Результаты каждого измерения выводятся на внешние устройства ЭВМ (АЦПУ, графический и алфавитно-цифровой дисплей, графопостроитель) и записываются на магнитофонную ленту. Перемещение платформы с блоком преобразователя, её остановка на заданном азимуте ускорителя, измерение и продолжение движения осуществляются автоматически. С её помощью впервые получен большой

массив информации (~40 тыс. значений) о показателе неоднородности МП синхрофазотрона без пребывания обслуживающего персонала в опасной зоне ускорителя и без значительных энергозатрат на возбуждение магнита /18/.

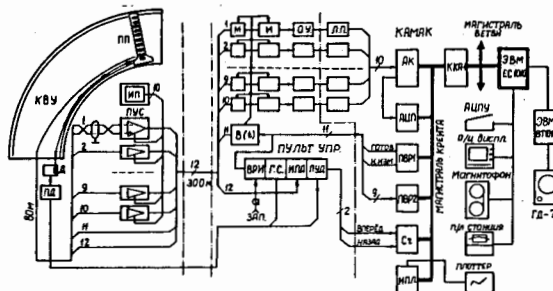


Рис. 7. Структурная схема многоканальной автоматизированной системы измерения динамического значения показателя неоднородности МП синхрофазотрона.

ПП - платформа с блоком преобразователей, ПУС - предусилитель, ИП - источники питания, Д - двигатель, М - управляемый аттенуатор, И - интегратор, ОУ - оконечный усилитель, ЛП - линейный приемник, АК - аналоговый коммутатор, В(t) - таймер, ВРИ - блок временных режимов измерений, ГС - громкая связь, ИПД - индикатор положения платформы, ПДУ - пульт управления двигателем, ПВР - параллельный входной регистр, КВУ - квадрант ускорителя.

В плане создания жесткофокусирующего ускорителя релятивистских ядер и протонов - Нуклотрона \* в ЛВЭ ОИЯИ разрабатывается технология и изготавливаются образцы сверхпроводящих магнитов. Высокие требования, которым должны удовлетворять магниты синхротронов, определяют необходимость создания прецизионной магнитометрической аппаратуры. Исследование магнитных характеристик рабочих образцов магнитов необходимо осуществлять не только при температуре жидкого гелия, но и при комнатных температурах. Это подтверждает и опыт работы со сверхпроводящими магнитами для Теватрона (ФНАЛ, США) \*\*. При этом оперативно и без значительных энергозатрат на криостатирование измеряются основные по-

\* Балдин А.М. и др. Труды IV-го Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Том II, М. 1975, с.4.

\*\* Fick H.E. et al. IEEE Trans. on Magnetics, No.1, 1981, p.420.

казатели магнитов (величина поля или градиента, их неоднородность в рабочей области апертуры, эффективная длина магнита, горизонтальная составляющая МП в диполях), а также выявляются возможные дефекты изготовления /19/.

В настоящее время для прецизионных исследований двумерных магнитных полей как в СССР, так и за рубежом применяется метод гармонического анализа данных, получаемых с датчика в процессе его вращения или поворота на определенные углы. Этот метод, впервые использованный для исследования полей квадрупольных линз \*, получил дальнейшее развитие в работах \*\* и работах с участием автора /20 - 23/. Наибольшее распространение в качестве датчиков нашли индукционные преобразователи, состоящие из одной или нескольких обмоток в виде плоских рамок /21/.

Структурная схема созданной при непосредственном участии автора измерительной системы, работающей в автоматизированном режиме на линии с ЭВМ МERA-60 или ЭВМ ЕС-1010 и реализующая указанный метод измерения импульсных МП, показана на рис.8 /24,25/.

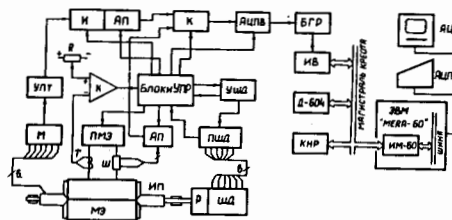


Рис. 8. Структурная схема автоматизированной системы измерения магнитных характеристик диполей и линз.

МЭ - исследуемый магнитный элемент, ИП - индукционный преобразователь, М - резисторный мост, И - интегратор, АП - аналоговая память, К - коммутатор, ШД - шаговый двигатель, ПШД - питание шагового двигателя, БГР - блок гальванической развязки, ИВ - интерфейс вольтметра, ПМЭ - питание магнитного элемента, КНР - крайний контроллер.

\* Dayton I.E. et al. Rev. Scient. Instr., 1954, v.25, No.5, p.485.

\*\* Греков Н.Н., Рябов А.П., Гольдин Л.Л. ПТЭ, 1956, №2, с.28.

\*\* Cobb J.K. et al. Int.Conf. on Mag.Techn., Hamburg, 1970, p.1439; Sampson W.B. et al. Int.Conf. on Mag.Techn., Brookhaven, 1972, p.752.

В диссертации в дополнение к известным работам, в которых анализируются погрешности измерения неоднородности МП, дана классификация источников погрешностей измерения основных гармоник МП диполей и линз, рассматриваются особенности схемных и методических приёмов, позволяющих повысить точность измерений величины поля или градиента, а также связанных с ними эффективной длины магнита и положения медианной поверхности. Для уменьшения погрешности, вызванной смещением преобразователя от оси вращения, предложена конструкция датчика /26/, использующего не одну, а две идентичные рамки, симметрично расположенные относительно оси вращения датчика. С целью определения метрологических параметров датчиков предложены и реализованы магнитные меры, одна из которых создает высокооднородное МП ( $\frac{\Delta B}{B} \leq 10^{-4}$ ) в сферическом объёме радиусом 56 мм, а вторая — дипольную или квадрупольную составляющую плоскопараллельного МП /27, 28/.

Исследования серии сверхпроводящих магнитов в "тёплом" режиме показали, что созданная измерительная аппаратура, работающая в автоматизированном режиме, обладает следующими характеристиками: погрешность относительных измерений основной гармоники —  $1 \cdot 10^{-4}$  для диполей и  $2 \cdot 10^{-4}$  для квадрупольных линз; погрешность в определении относительной эффективной длины магнита —  $2 \cdot 10^{-4}$  для диполей и  $5 \cdot 10^{-4}$  для линз; погрешность определения горизонтальной составляющей МП в диполе —  $3 \cdot 10^{-4}$ ; погрешность определения нелинейности МП —  $5 \cdot 10^{-5}$  для диполей и  $2 \cdot 10^{-4}$  для линз.

Измерения проводились в малоапертурных магнитах (50 мм для диполей и 32 мм для линз) на уровне МП, равном (0,03 ... 0,05) Т и градиенте 3 Т/м при крутизне нарастания тока возбуждения  $\sim 2$  кА/с. Время измерения и обработки результатов — 2 мин с ЭВМ ЕС-1010 и 30 мин на линии с ЭВМ МЕГА-60.

В последнем разделе главы приводятся некоторые экспериментальные результаты магнитных измерений на синхрофазотроне и описана методика их обработки /18/.

В заключении сформулированы основные итоги работы.

I. Разработан и создан комплекс диагностической аппаратуры, который используется для исследования основных характеристик инжектируемого пучка (величины и формы тока, поперечного эмиттанса пучка, энергетического спектра).

2. Проведены экспериментальные исследования динамики пучка в камере синхрофазотрона, результаты которых позволили подтвердить теоретические положения о влиянии пространственного заряда на темп потерь частиц в начальный период ускорения.

3. Разработан, создан и используется функциональный генератор

для модулятора энергии частиц, инжектируемых в кольцо ускорителя, который позволил улучшить согласование продольного эмиттанса пучка с продольным аксептансом синхрофазотрона.

4. Получены расчетные результаты оптимальных токов коррекции "H" при регулировании квадрупольной и секступольной составляющих магнитного поля синхрофазотрона с учетом координат проводников, находящихся в камере ускорителя.

5. Разработан унифицированный импульсный источник тока для питания корректирующих обмоток. Изготовлена серия из 32 источников, на базе которых осуществлена модернизация систем коррекции "H" и азимутальной асимметрии магнитного поля синхрофазотрона, что расширило функциональные возможности и повысило оперативность корректирующих систем.

6. Создана и эксплуатируется система оперативного измерения азимутальной неоднородности ведущего магнитного поля ускорителя.

7. Разработан и создан многоканальный магнитометр для исследования статических магнитных полей, в котором впервые применены гальваномагниторекомбинационные преобразователи. Магнитометр обладает высокой чувствительностью (150 В/Т) при сравнительно простой схеме усилительного тракта и используется для измерения распределения остаточного магнитного поля синхрофазотрона.

8. Разработана и изготовлена автоматизированная система для исследования показателя неоднородности магнитного поля синхрофазотрона, которая позволила впервые получить полную информацию о радиальном и азимутальном распределении "H" в рабочей области камеры синхрофазотрона и во всем диапазоне магнитных полей без пребывания людей в радиационной зоне и магнитном поле ускорителя.

9. Предложены и реализованы две новые конструкции индукционных датчиков, обладающих высокой чувствительностью и избирательностью к определенным гармоникам магнитного поля. Получены два авторских свидетельства.

10. Создан комплекс измерительной аппаратуры, работающий в автоматическом режиме на линии с ЭВМ для прецизионных исследований магнитных характеристик сверхпроводящих малоапертурных диполей и линз в "тёплом" режиме.

11. Проанализированы погрешности измерения, присущие индукционным магнитометрам; рассмотрены причины, приводящие к ошибкам измерения основных гармоник магнитного поля диполей и линз; даны рекомендации для проектирования узлов прецизионной измерительной аппаратуры.

Работы по оптимизации инжекции пучка в камеру синхрофазотрона,



а также модернизации системы коррекции магнитного поля совместно с другими усовершенствованиями ускорителя позволили существенно увеличить интенсивности пучков, ускоряемых в синхрофазотроне ОИЯИ.

Развитие магнитометрической аппаратуры, используемой для исследования характеристик динамического магнитного поля синхрофазотрона, способствовало созданию в Лаборатории высоких энергий базы измерительных приборов и технологии прецизионной магнитометрии, необходимых для исследования магнитных характеристик, проектируемых в ЛВЭ диполей и линз сверхпроводящего ускорителя - нуклотрона.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах /1 - 28/:

1. Воеводин М.А. Измерение ионного тока магнитоиндукционными датчиками на участке инжекции синхрофазотрона, ОИЯИ, IO-4600, Дубна, 1969.
2. Воеводин М.А., Сайфулин Ш.З. Бесконтактная система измерения пучка и наблюдение за ним на участке инжекции синхрофазотрона ОИЯИ, ОИЯИ, 9-4834, Дубна, 1969.
3. Безногих Ю.Д., Бонч-Осмоловский А.Г., Воеводин М.А., Зиновьев Л.П. О повышении интенсивности пучка, ускоряемого в синхрофазотроне ОИЯИ. Часть I. (Экспериментальные результаты, основные представления о кулоновском сдвиге частот колебаний), ОИЯИ, P9-9115, Дубна, 1975.
4. Безногих Ю.Д., Бонч-Осмоловский А.Г., Воеводин М.А., Зиновьев Л.П. О повышении интенсивности пучка, ускоренного в синхрофазотроне ОИЯИ. Часть II. (Резонансные потери, сравнение эксперимента и теории. Дальнейшие перспективы), ОИЯИ, P9-9120, Дубна, 1975.
5. Безногих Ю.Д., Воеводин М.А., Сайфулин Ш.З. Функциональный генератор управляющего напряжения модулятора энергии линейного ускорителя, ПТЭ, 1979, № 2, с.40-42.
6. Воеводин М.А., Коруков Н.А. Импульсный источник тока с программным управлением для коррекции "н" синхрофазотрона, ОИЯИ, 9-7318, Дубна, 1973.
7. Воеводин М.А. и др. Система коррекции показателя спада магнитного поля синхрофазотрона, ОИЯИ, 9-9625, Дубна, 1976.
8. Воеводин М.А. и др. Схема оперативного измерения азимутальной асимметрии магнитного поля синхрофазотрона, ОИЯИ, 9-10266, Дубна, 1976.
9. Воеводин М.А. и др. Расчет коррекции градиента магнитного поля синхрофазотрона, ОИЯИ, P9-81-354, Дубна, 1981.

10. Безногих Ю.Д. .... Воеводин М.А. и др. Повышение интенсивности ускоренного протонного пучка в синхрофазотроне ОИЯИ. В кн.: Труды У-го Всесоюзного совещания по ускор. заряж. частиц, т. II, М., "Наука", 1977, с.245-247.
11. Безногих Ю.Д. .... Воеводин М.А. и др. Экспериментальные результаты по повышению интенсивности ускоряемых пучков в синхрофазотроне ОИЯИ и их анализ. В кн.: Труды У1-го Всесоюзного совещания по ускор. заряж. частиц, т. II, ОИЯИ, Дубна, 1979, с.136-132.
12. Воеводин М.А. и др. Импульсный индукционный магнитометр, ОИЯИ, I3-II855, Дубна, 1978.
13. Воеводин М.А. и др. Многоканальный магнитометр с использованием гальваноманниторекомбинационных преобразователей. - В сб.: Тезисы докладов на Всесоюзной научно-технической конференции "Теория, методы и средства измерения магнитных величин" - Ленинград, 1977, с.35, а также в журнале ПТЭ, 1978, № 6, с.143.
14. Воеводин М.А. Источник стабильного напряжения синусоидальной формы для возбуждения гальваноманниторекомбинационных преобразователей, ОИЯИ, I3-10822, Дубна, 1977.
15. Воеводин М.А., Романов Ю.И. Измерительный тракт и коммутатор многоканального магнитометра с гальваноманниторекомбинационными датчиками, ОИЯИ, I3-10907, Дубна, 1977.
16. Воеводин М.А. Авт. свидетельство СССР № 631848, от 17.06.78. Бюлл. ОИПОТЗ, 1978, № 41, с.170.
17. Воеводин М.А. и др. Многоканальная автоматизированная система для измерения показателя неоднородности магнитного поля синхрофазотрона на линии с ЭВМ ЕС-1010. - В кн. Труды У11-го Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. т. II, Дубна, 1981, с.272-276.
18. Безногих Ю.Д. .... Воеводин М.А. и др. Исследование неоднородностей магнитного поля синхрофазотрона. О динамике пучка малой интенсивности, ОИЯИ, 9-81-570, Дубна, 1981.
19. Алфеев В.С., Воеводин М.А. и др. Получение полей высокой однородности в сверхпроводящих магнитах типа "оконная рама" в кн.: Труды У11-го Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, ОИЯИ, т. I, Дубна, 1981, с.360-363.
20. Воеводин М.А., Коваленко А.Д. Исследование двумерных магнитных полей методом гармонического анализа. Часть I. (Основы метода), ОИЯИ, P9-12233, Дубна, 1979.
21. Воеводин М.А., Коваленко А.Д. Исследование двумерных магнитных полей методом гармонического анализа. Часть 2. (Измерительные катушки). ОИЯИ, P9-12378, Дубна, 1979.

22. Воеводин М.А., Коваленко А.Д. Исследование двумерных магнитных полей методом гармонического анализа. Часть 3. (Определение чувствительности к магнитному полю измерительных катушек), ОИЯИ, Р9-80-432, Дубна, 1980.
23. Воеводин М.А., Коваленко А.Д. Использование гармонического анализа при экспериментальных исследованиях магнитных полей в системах управления движением заряженных частиц. В сб: Тезисы докладов на II-й Всесоюзной конференции "Методы и средства измерения параметров магнитного поля" - Ленинград, 1980, с.110.
24. Воеводин М.А. 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. т.II, ОИЯИ, Дубна, 1981, с.290-293,
25. Воеводин М.А. и др. Оперативная система прецизионной магнитометрии диполей и линз методом гармонического анализа, ОИЯИ, Р9-80-595, Дубна, 1980.
26. Воеводин М.А., Коваленко А.Д. Авторское свидетельство СССР № 711505, от 13.04.78. Бюлл. ОИПОТЗ, 1980, № 3, с.201.
27. Воеводин М.А., Коваленко А.Д., Черников В.И. Четырехсекционная катушка с однородным магнитным полем, ОИЯИ, Р13-12897, Дубна, 1979.
28. 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.

Рукопись поступила в издательский отдел  
30 сентября 1982 года.