

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

С345

Г-859

9-5281

А.М. Гришин

**СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ
ФАЗЫ ПРОЛЕТА ПУЧКА УСКОРЕННЫХ ЧАСТИЦ
В РЕЛЯТИВИСТСКОМ ЦИКЛОТРОНЕ**

**Специальность 280 - электрофизические установки
и ускорители**

Автореферат диссертации на соискание учёной
степени кандидата технических наук

Дубна 1970

Работа выполнена в Радиотехническом институте Академии наук СССР

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор Ф.А. Водопьянов

Официальные оппоненты:
доктор технических наук Ю.Н. Денисов,
кандидат технических наук Г.И. Бацких.

Ведущее предприятие: научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова.

Автореферат разослан " " 1970 г.
Защита диссертации состоится " " 1970 г.
на заседании Учёного совета Лаборатории ядерных проблем
Объединенного института ядерных исследований.

-Адрес: г. Дубна, Московская область, Объединенный институт ядерных исследований, Лаборатория ядерных проблем.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Учёный секретарь Совета

О.А. Займидорога

9-5281

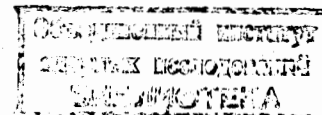
А.М. Гришин

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ
ФАЗЫ ПРОЛЕТА ПУЧКА УСКОРЕННЫХ ЧАСТИЦ
В РЕЛЯТИВИСТСКОМ ЦИКЛОТРОНЕ

Специальность 280 - электрофизические установки
и ускорители

Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук

714269



За последнее десятилетие в области ускорительной техники значительное внимание уделяется теоретическому исследованию, инженерному расчёту и сооружению циклотронов с пространственной вариацией магнитного поля или изохронных циклотронов. В настоящее время во всем мире введено в эксплуатацию или находится в стадии изготовления и разработки несколько десятков таких ускорителей (см., например, /1-4/). Для проведения фундаментальных исследований в области ядерной физики проектируется несколько типов изохронных циклотронов на энергии порядка 500-1000 Мэв (так называемые "мезонные фабрики") /5-7/.

Одним из наиболее значительных проектов такого рода является предложенный Объединенным институтом ядерных исследований проект реконструкции существующего фазотрона ОИЯИ в изохронный циклотрон, предназначенный для ускорения протонов до энергии 700 Мэв /8/.

Задача создания релятивистского циклотрона на энергию 700 Мэв выдвинула ряд сложных проблем. К числу таких проблем относится (и является, пожалуй, наиболее важной) проблема формирования, измерения и стабилизации магнитного поля с весьма высокой степенью точности. Отклонение радиальной зависимости среднего по азимуту магнитного поля от требуемого закона вызывает нарушение оптимального режима ускорения вследствие смещения фазы пролета ускоряемых частиц. Ввиду отсутствия фазовой устойчивости необходимо выполнение жестких допусков на точность зависимости среднего по азимуту маг-

нитного поля от радиуса и стабильности этой зависимости во времени.

Реферируемая диссертация посвящена разработке и исследованию системы автоматической стабилизации фазы пролета сгустков ускоренных частиц для релятивистского циклотрона на энергию 700 Мэв ОИЯИ. Система стабилизации фазы позволяет наиболее точно оптимизировать режим ускорения при сравнительно свободных допусках на точность и стабильность магнитного поля. Диссертация является обобщением работ автора, сделанных в коллективе сотрудников Радиотехнического института АН СССР за период с 1962 по 1967 г.г. и состоит из введения, пяти глав и заключения.

1. Получение информации о фазовом положении сгустков ускоренных частиц в ускорителях циклотронного типа

Задача получения информации о фазовом положении сгустков частиц относительно ускоряющего поля сводится к получению и обработке сигнала, пропорционального мгновенной азимутальной плотности частиц в ускоряемом сгустке.

К моменту начала работы, результаты которой изложены в реферируемой диссертации, в литературе отсутствовали какие-либо сведения о возможности получения информации о фазовом положении ускоряемых частиц в ускорителях циклотронного типа без нарушения процесса ускорения. В первых образцах изохронных циклотронов для получения информации о пучке использовались применяемые ранее в обычных циклотронах внутренние мишени (пробники)^{/9,10/}.

Анализ методов получения информации о пучке без нарушения процесса ускорения, применяющихся в других типах ускорителей, позволил сделать вывод, что наиболее подходящим для цели построения системы стабилизации фазы является метод, использующий электростатические сигнальные электроды,

расположенные в полости дуанта выше или ниже области нахождения пучка. Этот вывод подтвердили появившиеся позднее и независимо от нашей работы сообщения о создании аналогичных устройств в США и ФРГ^{/11,12/}.

Поскольку сигнальные электроды должны быть размещены внутри дуанта, находящегося под высокочастотным напряжением, амплитуда которого достигает величины порядка сотен киловольт, а частота совпадает с первой гармоникой последовательности импульсов полезного сигнала, возникает задача выделения полезного сигнала на фоне синхронных помех, амплитуда которых может быть соизмерима с уровнем полезного сигнала. Для решения указанной задачи было предложено использовать в качестве полезного сигнала вторую гармонику напряжения, наведенного пучком на сигнальный электрод^{/13/}. Ввиду того, что полезный сигнал представляет собой последовательность острых импульсов с большой скважностью, чувствительность сигнального электрода по второй гармонике будет мало отличаться от таковой по первой гармонике. В то же время ввиду высокой добротности высокочастотной резонансной системы циклотрона трудно ожидать присутствия в высокочастотном ускоряющем поле высших гармонических составляющих значительной амплитуды. Иначе говоря, при использовании в качестве полезного сигнала второй гармоники напряжения на сигнальном электроде отношение уровня полезного сигнала к уровню паразитных наводок должно быть много выше, чем при использовании первой гармоники или всего спектра полезного сигнала.

В диссертации приведена оценка чувствительности плоских электростатических сигнальных электродов в предположении, что азимутальная длина электрода существенно меньше азимутальной протяженности сгустков ускоренных частиц, а радиальная ширина его существенно больше расстояния между соседними орбитами. При этих допущениях среднее за период ускоряющего поля напряжение, наведенное пучком, находящимся в медианной плоскости, на сигнальный электрод, определяется формулой

$$U_{\text{ср}} = \frac{I S_{\text{э}}}{2 \omega_0 C_{\text{э}} r \Delta r} \quad (1)$$

в которой I - ток пучка, $S_{\text{э}}$ и C - площадь и емкость сигнального электрода, ω_0 - частота ускоряющего поля,

r - радиус расположения сигнального электрода, Δr - расстояние между соседними орбитами.

По известной величине $U_{\text{ср}}$ можно при любом законе азимутального распределения плотности зарядов в сгустке найти амплитуды гармоник (U_{ω}) полезного сигнала, пользуясь очевидным соотношением

$$U_{\omega} = \gamma_{\omega} U_{\text{ср}}, \quad (2)$$

где γ_{ω} - коэффициент формы импульса для соответствующей гармоники.

Для уменьшения паразитных наводок в качестве коммуникационной линии от сигнального электрода к последующим устройствам используется коаксиальный фидер. При этом ввиду значительных размеров дуанта и вакуумной камеры ускорителя необходимо фидер рассматривать как линию с распределенными параметрами, длина которой соизмерима с длиной волны передаваемого сигнала.

При использовании в качестве полезного сигнала второй гармоники напряжения, наведенного пучком на сигнальный электрод, необходимо для повышения коэффициента передачи системы электрод-фидер настроить эту систему в резонанс с частотой второй гармоники. Настройка осуществляется с помощью конденсатора переменной емкости, включенного на конце фидера. Величина резонансного коэффициента передачи в этом случае определяется формулой:

$$K_{\text{макс.}} = \omega C \frac{\frac{w}{\text{sh } \beta l} R_{\text{н}}}{\frac{w}{\text{sh } \beta l} + R_{\text{н}}}, \quad (3)$$

в которой $R_{\text{н}}$ - сопротивление нагрузки фидера - входное сопротивление последующего устройства.

Для определения резонансного значения емкости настройки получена формула

$$C_{\text{нрез}} = \frac{\omega w C_{\text{э}} + \text{tg } a l}{\omega w (\text{tg } a l \omega w C_{\text{э}} - 1)}, \quad (4)$$

где l - длина фидера.

Из полученного выражения для $K_{\text{макс}}$ следует, что влияние затухания эквивалентно наличию на конце линии приведенного сопротивления R_{β} , величина которого равна

$$R_{\beta} = \frac{w}{\text{sh } \beta l}. \quad (5)$$

Учитывая формулу для определения чувствительности сигнального электрода, можно получить общее выражение, характеризующее чувствительность системы получения сигнала от пучка, т.е. отношение напряжения n -ой гармоники на выходе фидера к току пучка

$$\alpha_{\omega} = \frac{U_{\text{вых}}}{I} = n \gamma_{\omega} \frac{S_{\text{э}}}{2r \Delta r} \cdot \frac{R_{\beta} R_{\text{н}}}{R_{\beta} + R_{\text{н}}}. \quad (6)$$

Таким образом, следует признать целесообразным для повышения чувствительности увеличивать площадь сигнальных электродов до значений, ограниченных вышеупомянутым условием и конструктивными соображениями. При этом, однако, необходимо учесть, что с увеличением площади электродов увеличивается уровень паразитных наводок.

Теоретическое значение чувствительности системы получения сигнала от пучка для релятивистского циклотрона при площади сигнального электрода $1,8 \times 15 \text{ см}^2$ и при использовании в качестве фидера воздушного коаксиального кабеля составляет примерно 1 мв/мка.

Экспериментальные исследования, проведенные на действующем циклотроне ЛЯП ОИЯИ^{/14/}, подтвердили правильность теоретических положений, положенных в основу анализа системы получения сигнала от пучка. Чувствительность системы составляет примерно 0,7 - 0,8 мв/мка; при этом уровень паразитных наводок на частоте второй гармоники полезного сигнала имеет величину порядка 100-300 мкв при напряжении на дуанте 35 кв (уровень паразитных наводок на частоте первой гармоники много выше - 5-20 мв)^{/15/}.

II. Многоконтурная система стабилизации фазы

Система стабилизации фазы пролета сгустками протонов ускоряющего промежутка предназначается для автоматического поддержания оптимальных фазовых условий ускорения путем коррекции закона изменения по радиусу среднего значения напряженности магнитного поля. Система обеспечивает стабильность фазы относительно оптимального значения с точностью $\pm 10^0$ во всем диапазоне энергий пучка при возмущениях среднего по азимуту магнитного поля не более $\pm 20 \text{ э}$ ($\pm 0,2\%$) и при средней интенсивности пучка 1-500 мка. Ускоритель может работать в непрерывном и импульсном режимах.

Формирование требуемой радиальной зависимости магнитного поля в проектируемом релятивистском циклотроне обеспечивается с помощью совокупности 22 пар концентрических катушек тонкой коррекции. Этими катушками весь рабочий интервал радиусов орбит делится на 22 участка. В соответствии с этим система автоматической стабилизации фазы пролета должна содержать ряд отдельных контуров регулирования, стабилизирующих фазу на каждом из этих участков.

Каждый контур системы содержит объект регулирования и регулятор. Объектом регулирования является пучок, регулируемой величиной - фаза пролета пучка ϕ , регулирующим воздействием - изменение магнитного поля, создаваемого током в катушках тонкой коррекции ΔH . Возмущающим воздействием является изменение магнитного поля на данном интервале значений радиуса ΔH_b .

Регулятор каждого контура системы содержит измерительный и регулирующий элементы. Измерительный элемент служит для измерения фазы пролета ϕ и получения электрического сигнала, пропорционального отклонению регулируемой величины от заданного оптимального значения. Регулирующий элемент каждого контура состоит из соответствующей пары катушек тонкой коррекции и усилителя тока, питающего эти катушки. Усилитель тока управляется напряжением с измерительного элемента и имеет коэффициент передачи, обеспечивающий получение требуемого значения коэффициента регулирования.

Отличительной особенностью рассматриваемой системы является наличие связей между ее контурами по регулирующим элементам за счёт того, что магнитное поле каждой пары катушек распространяется на все участки, расположенные ближе к центру ускорителя, чем рассматриваемый, а также на ближайший участок, расположенный дальше от центра. Существует также связь через объекты регулирования, так как изменение фазы на каждом участке определяется не только местными возмущениями магнитного поля, но и изменением фазы на предыдущем участке.

Таким образом, система автоматической стабилизации фазы представляет собой многоконтурную (с числом контуров $n = 22$) систему авторегулирования, в которой отдельные контуры связаны между собой через объекты регулирования и через регулирующие элементы^{/16/}. Система уравнений, описывающих эту многоконтурную систему, имеет вид:

а) все контуры системы считаются идентичными (по $k\beta$ и частотным свойствам);

б) каждый контур имеет только одно инерционное звено с постоянной времени τ ; влияние остальных звеньев не учитывается. Это близко соответствует реальной ситуации, т.к. в контуре имеется одна постоянная времени, существенно большая всех остальных. Эта постоянная соответствует звену "корректирующая катушка" и определяется влиянием вихревых токов в теле полюсного наконечника.

Частотные характеристики звеньев связи были определены экспериментальным путем при измерении частотных характеристик поля на всех участках при изменении тока в катушке i -го участка. Показано, что звено связи δ является безинерционным звеном, а звено a - одноинерционным с постоянной времени, увеличивающейся по мере удаления от i -го участка к центру ускорителя.

Для анализа устойчивости многоконтурной системы в диссертации используется метод построения кривых D -разбиения в плоскости одного параметра $-k\beta$ одного контура регулирования при фиксированных $k\beta$ всех других контуров.

Характеристическое уравнение системы получается приравнением к нулю определителя системы уравнений (7):

$$\Delta_n = \begin{vmatrix} R(p) & S_1(p) & S_2(p) & \dots & S_{i-1}(p) & \dots & S_{n-1}(p) \\ T(p) & R(p) & S_1(p) & \dots & S_{i-1}(p) & \dots & S_{n-2}(p) \\ 0 & T(p) & R(p) & \dots & S_{i-2}(p) & \dots & S_{n-3}(p) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & T(p) & R(p) & S_1(p) \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & T(p) & R(p) \end{vmatrix} = 0, \quad (8)$$

где

$$R(p) = \frac{k\beta + (1+p\tau)}{k(1+p\tau)}, \quad T(p) = -\frac{\delta k\beta + (1+p\tau)}{k(1+p\tau)}, \quad S_i(p) = \frac{aB}{(1+p\tau)(1+p^2\tau^2)}$$

Уравнение кривой D -разбиения по $k\beta$ любого (i -го) контура легко может быть получено разложением определителя n -го порядка (левой части характеристического уравнения) по элементам i -го столбца, поскольку эти элементы линейно зависят от интересующего нас параметра $k\beta_i$.

При выполнении вышеуказанных упрощающих предположений положение кривых D -разбиения, построенных на плоскости $k\beta$ любого контура, и, следовательно, областей устойчивости не зависит от числа контуров n . Точнее, положение точки кривой, соответствующей нулевой частоте ($p = 0$), не зависит от n и положение асимптоты кривой при $p \rightarrow \pm \infty$ также не зависит от n . В диссертации приводятся доказательства этих двух утверждений.

Анализ кривых D -разбиения позволил определить области устойчивости по $k\beta$ всех контуров системы ($k\beta_1 = 1,78 + \infty$, $k\beta_i (1 < i < n) = -1,67 + \infty$, $k\beta_n = -0,87 + \infty$) и сделать основной вывод, касающийся динамического режима исследуемой системы: многоконтурная система авторегулирования, содержащая в каждом контуре только одно инерционное звено, при наличии данного конкретного вида связей между контурами будет устойчивой при любом числе контуров n .

Далее в диссертации анализируется влияние на устойчивость многоконтурной системы малых постоянных времени реального контура, которые в предыдущем анализе не учитывались. Получены уравнения для построения кривых D -разбиения на плоскости параметра $k\beta$ любого из контуров системы в районе правой границы области устойчивости (т.е. в районе допустимых значений $k\beta_i$).

Полученные в результате анализа и численного решения этих уравнений выводы можно кратко сформулировать следующим образом:

1) Устойчивость многоконтурной системы с тремя инерционными звеньями в каждом контуре и при наличии указанного вида связей ниже устойчивости одного контура и тем ниже, чем больше n .

2) При увеличении числа контуров темп снижения устойчивости замедляется. Практически уже при $n = 5-6$ достигается предельное снижение устойчивости.

3) При одновременном увеличении коэффициентов регулирования всех контуров 22-контурной системы максимально допустимое значение $k\beta$, при котором еще сохраняется устойчивость, равно ≈ 65 , что существенно больше необходимых значений $k\beta = 10-30$. Таким образом, исследуемая система стабилизации фазы для релятивистского циклотрона обладает значительным запасом устойчивости.

III. Разработка элементов системы стабилизации фазы и результаты экспериментальных исследований

В процессе работы над диссертацией были проведены анализ и расчёты схем электронной аппаратуры, экспериментальные исследования макетов блоков, а также выпущены рабочие чертежи и головные образцы блоков, входящих в состав одного контура системы стабилизации фазы. Четвертая глава диссертации в основном посвящена описанию разработанных элементов электронной аппаратуры.

В состав аппаратуры одного контура системы входят следующие устройства: сигнальный электрод с системой вывода сигнала пучка, смеситель, датчик фазы и усилитель тока. Кроме того, в состав аппаратуры системы входят элементы, общие для всех контуров регулирования - датчик ускоряющего напряжения и гетеродин. Блок-схема одного контура регулирования системы приведена на рис. 1.

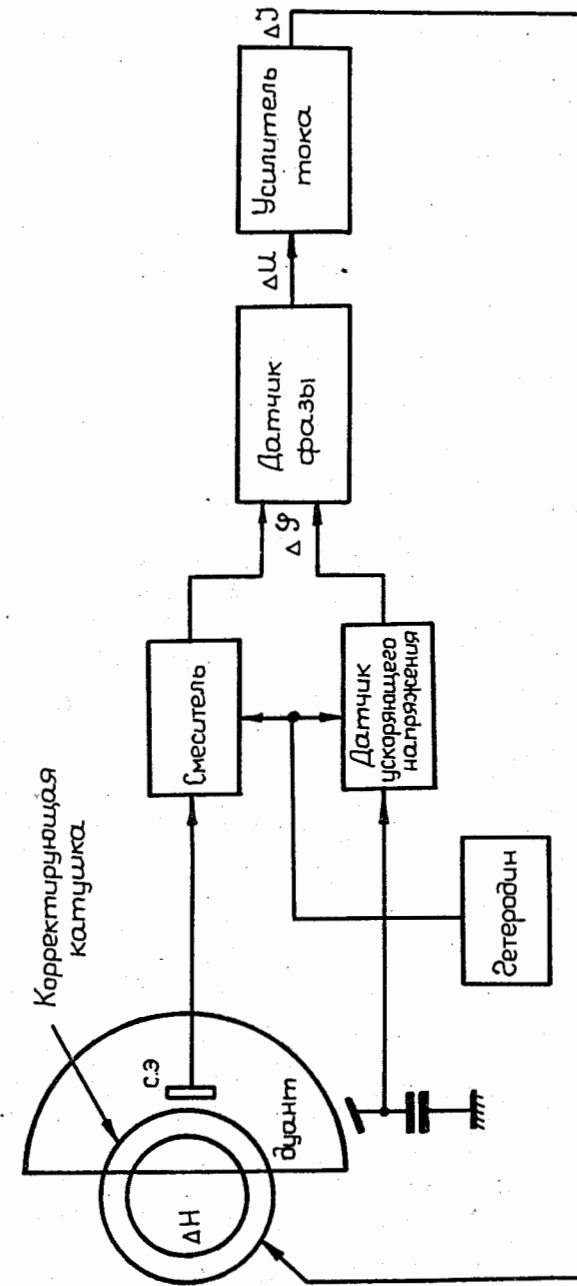


Рис. 1

В каждом из двух дуантов релятивистского циклотрона размещено по 22 пары сигнальных электродов - на верхней и нижней плакировках дуантов. Радиальное расположение пар электродов соответствует интервалам между катушками тонкой коррекции. Электрод представляет собой плоскую пластину из посеребренной латуни, окруженную латунной охранной рамкой, предназначенной для защиты от прямого попадания частиц. Для передачи напряжения от электрода к последующему устройству (смесителю) используется коаксиальный фидер с воздушной изоляцией. Собственная фазовая ошибка системы электрод-фидер не превышает $\pm 3^\circ$ при отношении полезного сигнала к паразитным наводкам не менее 15 и при изменении частоты полезного сигнала и параметров системы не более 15%.

Из-за высокого уровня радиации в помещении, где расположен ускоритель, все основные элементы электронной аппаратуры расположены в зале электроники, удаленном от ускорителя на десятки метров. Для устранения влияния наводок на коммуникации частота напряжения на выходе системы электрод-фидер понижается до величины $F = 2$ Мгц с помощью гетеродинирования. Таким образом, входным элементом контура регулирования является смеситель, расположенный в непосредственной близости от ускорителя. Смеситель собран по кольцевой балансной схеме на ламповых диодах. Коэффициент передачи его с учётом нагрузки равен 0,3-0,4. Собственная фазовая ошибка смесителя не превышает $\pm 1^\circ$ при изменении амплитуды входного сигнала в 500 раз.

Датчик фазы служит для усиления сигнала пучка и получения напряжения, пропорционального разности фаз сигнала пучка и ускоряющего напряжения. Он содержит усилитель промежуточной частоты $F = 2$ Мгц с АРУ, фазовый детектор и фазовращатель, включенный в тракт ускоряющего напряжения. Максимальный коэффициент усиления УПЧ равен 20000; система АРУ обеспечивает стабильность коэффициента передачи блока $K_{д.ф.} = \Delta U_{\text{вых}} / \Delta \phi$ не хуже $\pm 10\%$ при изменении амплитуды сигнала

пучка в 200 раз. Собственная фазовая ошибка датчика фазы не превышает $\pm 7^\circ$ при изменении амплитуды входного сигнала в указанных пределах и при стабильности частоты входных сигналов и частоты гетеродина порядка $\pm 10^{-4}$.

Выходное напряжение датчика фазы поступает на вход усилителя тока, который предназначен для усиления сигнала ошибки и получения пропорционального этому сигналу постоянного тока, питающего соответствующую пару катушек тонкой коррекции. Пределы изменения тока нагрузки ± 12 а при величине коэффициента передачи усилителя 20а/в в полосе частот 0-10 кгц. Нестабильность выходного тока в течение недели составляет $\pm 0,15$ а.

Датчик ускоряющего напряжения служит для получения напряжения промежуточной частоты, фаза которого жестко связана с фазой ускоряющего напряжения на дуанте. Полученный сигнал поступает на фазовращатель блока датчика фазы. Сигнал на вход датчика ускоряющего напряжения поступает с емкостного делителя напряжения на дуанте. Датчик содержит удвоитель частоты, смеситель, УПЧ с АРУ и совокупность выходных эмиттерных повторителей.

Гетеродин включает собственно гетеродин, генерирующий напряжение с частотой, отличающейся от частоты второй гармоники сигнала пучка на величину $F = 2$ Мгц, и выходное устройство - совокупность эмиттерных повторителей.

В пятой главе диссертации описаны результаты экспериментальных исследований, проводившихся в процессе разработки системы стабилизации фазы для релятивистского циклотрона на действующем циклотроне с пространственной вариацией магнитного поля ЛЯП ОИЯИ. За период с 1962 по 1967 г.г. были проведены исследования, связанные с разработкой системы получения информации о пучке, исследование характеристик корректирующих катушек магнита циклотрона и, наконец, исследование макетной шестиконтурной системы стабилизации фазы.

Экспериментальные исследования макетной шестиконтурной системы стабилизации фазы показали правильность всех теоретических принципов, положенных в основу анализа системы стабилизации фазы для релятивистского циклотрона, и соответствие характеристик всех ее элементов поставленным требованиям. В каждом контуре макетной системы был реализован коэффициент регулирования, равный 10 в полосе частот 0–500 гц. Исследования подтвердили несомненную целесообразность применения системы стабилизации фазы для улучшения работы ускорителя. С помощью регулировки токов в катушках тонкой коррекции поля, входящих в состав системы, удалось наиболее точно подобрать требуемый закон изменения магнитного поля по радиусу и получить на конечных радиусах ускорения (52–54 см) интенсивность пучка до 2 мка, чего не удавалось сделать до включения системы. Наличие системы стабилизации фазы существенно повышает стабильность работы ускорителя, определяемую стабильностью тока пучка на конечных радиусах. Если ранее, до включения системы приходилось в течение рабочего дня неоднократно производить регулировку токов в сильноточных катушках коррекции магнитного поля, то при включенной системе стабилизации фазы хорошая стабильность тока пучка обеспечивается в течение рабочего дня без каких-либо регулировок. Длительные исследования работы системы показали высокую надежность всех ее элементов.

Основные результаты, полученные в диссертационной работе.

1. С целью ослабления допусков на точность радиальной зависимости среднего по азимуту магнитного поля и стабильность этой зависимости во времени для проектируемого релятивистского циклотрона ОИЯИ на энергию 700 Мэв разработана система автоматической стабилизации фазы пролета центра тяжести сгустков ускоряемых частиц путем измерения фазы пролета на некоторых фиксированных значениях радиуса и коррекции магнитного поля сигналами, пропорциональными отклонению

фазы пролета от оптимального значения. Система представляет собой многоконтурную (с числом контуров $n = 22$) систему авторегулирования, в которой отдельные контуры связаны между собой через объекты регулирования и через регулирующие элементы. Показано, что система обеспечивает стабилизацию фазы пролета с точностью $\pm 10^0$ во всем диапазоне энергий ускоряемых частиц при возмущениях магнитного поля до $\pm 0,2\%$ в полосе частот от нуля до нескольких сотен герц.

2) Так как известные из литературы методы получения информации о пучке в ускорителях циклотронного типа оказались непригодными для измерения фазового положения сгустков ускоряемых частиц относительно ускоряющего поля без нарушения процесса ускорения, был разработан новый метод, позволяющий решить эту задачу с использованием плоских электростатических сигнальных электродов, размещенных в полости дуанта ускорителя. Доказана целесообразность использования в качестве полезного сигнала второй гармоники напряжения, наведенного пучком на сигнальный электрод. Чувствительность электродов такого типа порядка 1 мв/мка; точность измерения фазы $\pm 3^0$ при отношении полезного сигнала к паразитным наводкам не менее 15.

3) На основе сформулированных требований к элементам системы разработаны принципиальные схемы радиоэлектронных устройств, входящих в каждый контур регулирования и общий для всей системы. Лабораторные испытания показали соответствие характеристик разработанных блоков поставленным требованиям. Проверка теоретических и технических принципов построения многоконтурной системы стабилизации для релятивистского циклотрона была проведена на действующем циклотроне ЛЯП ОИЯИ. Исследования подтвердили возможность реализации указанной системы и целесообразность применения ее для улучшения работы ускорителя. Было достигнуто существенное повышение стабильности работы ускорителя, определяемой

стабильностью тока пучка на конечных радиусах. Отмечена высокая надежность разработанной аппаратуры.

4) Описанные в диссертационной работе принципы получения информации о пучке в ускорителях циклотронного типа, а также разработанная электронная аппаратура с небольшими модификациями и добавлениями могут быть использованы для измерения без нарушения процесса ускорения таких важных параметров пучка в циклотронах, как интенсивность, положение пучка относительно медианной плоскости, точное фазовое положение сгустков частиц относительно ускоряющего поля.

Основные результаты диссертационной работы доложены на международной и всесоюзной конференциях по ускорителям, а также опубликованы в двух печатных работах, в четырех научных отчетах и одном техническом проекте.

Л и т е р а т у р а

1. D.J. Clark et al. Nucl.Instr. and Meth., 1962, v.18,19p.1
2. E.L. Kelly. Nucl.Instr. and Meth. 1962, v.18,19. p.33.
3. A. Luccio et al. Nucl.Instr. and Meth., 1962, v.18,19.
4. А.А. Аргуманов и др. Труды международной конференции по ускорителям. Дубна, 21-27 августа, 1963 г. Атомиздат, 1964.
5. W. Müller, W. Wolff. Nucl.Instr. and Meth. 1962, v.18,19.p.447.
6. J.R. Richardson. Nucl.Instr. and Meth., 1962, v.18,19, p.457.
7. R.S. Livingston, J.A. Martin Труды международной конференции по ускорителям. Дубна, 21-27 августа 1963 г. Атомиздат, 1964.
8. А.А. Глазов, Ю.Н. Денисов, В.П. Джелепов и др. Труды международной конференции по ускорителям. Дубна, 21-27 августа 1963 г. Атомиздат. 1964.
9. C.G. Dols. Nucl.Instr. and Meth. 1962, v.18,19, p.595
10. R.J. Jones. Nucl.Instr. and Meth. 1962, v.18,19, p.469.
11. W.H. White et al. Nucl.Instr. and Meth. 1962, v.18,19, p.601.

12. Патент ФРГ № 1202914 (L 42495 VIII с/21§) от 14/X-1965г.
13. А.А. Кузьмин. Авторское свидетельство № 173344 от 18/V11-1963 г.
14. Д.П. Василевская, А.А. Глазов и др. Атомная энергия, 1960, т. 8.
15. А.М. Гришин, А.А. Кузьмин. НТД-6316Р РАИ АН, 1963.
16. А.М. Гришин, А.А. Кузьмин. Труды международной конференции по ускорителям. Дубна, 21-27 августа 1963 г. Атомиздат, 1964.

Рукопись поступила в издательский отдел
23 июля 1970 года.