

7-586
ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

9 - 10463

ЧИГАК Милан

СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ
РЕЖИМА УСКОРЕНИЯ В ИЗОХРОННЫХ ЦИКЛОТРОНАХ
ПО ФАЗЕ ПРОЛЕТА ПУЧКА
С ПРИМЕНЕНИЕМ УПРАВЛЯЮЩЕЙ ЦВМ

Специальность 01.04.13 - электрофизика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Дубна 1977

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем
Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель: доктор технических наук Ю.Н. ДЕНИСОВ

Официальные оппоненты:

доктор технических наук И.А. ШЕЛАЕВ,

кандидат технических наук Л.И. ЮДИН.

Ведущее научно-исследовательское учреждение:

Радиотехнический институт АН СССР, Москва.

Автореферат реферат " " 1977 г.

Защита диссертации состоится " " 1977 г. в " ча-
сов на заседании специализированного Ученого совета Лаборатории
ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований,
г. Дубна, Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Ученый секретарь специализированного Совета

кандидат физико-математических наук

Ю.А. БАТУСОВ

Среди ускорителей, используемых в ядерных исследовательских лабораториях мира, изохронные циклотроны являются наиболее многочисленной группой. Благодаря расширению диапазона энергии ускоряемых частиц (до 800 МэВ по протонам) и возможности ускорения пучков высоких интенсивностей, циклотроны находят широкое применение также в области прикладных наук и в народном хозяйстве.

Большой вклад в развитие изохронных циклотронов своими теоретическими и экспериментальными исследованиями уже более двух десятилетий вносит Лаборатория ядерных проблем ОИЯИ в Дубне. При сооружении новых циклотронов (электронная модель кольцевого циклотрона ЭМКЦ и изохронный циклотрон с регулируемой энергией У-120М) и разработке новых проектов в этой лаборатории большое внимание уделяется вопросам контроля и стабилизации режима ускорения и вывода пучка. Высокое качество управления режимом ускорения необходимо как в высокоточных ускорителях с мощностью в пучке, достигающей десятков МВт, так и в циклотронах с регулируемой энергией и с повышенными требованиями к моноэнергетичности ускоренных ионов. В реферируемой диссертации приведены результаты теоретических и экспериментальных работ по данной теме, выполненных автором в лаборатории. Рассматривается многомерная система управления фазой пролета, осуществляемого в цепи, замкнутой через управляющую ЦВМ^{4,5/}. Зависимость от радиуса фазы пролета пучка относительно в.ч. ускоряющего напряжения измеряется с помощью индукционных датчиков. Сигналы, введенные на датчиках пучком, проходя через многоканальный коммутатор, управляемый ЦВМ, после стробоскопического преобразования и кодирования математически обрабатываются в ЦВМ. Полученные таким образом на дискретных радиусах циклотрона фазы пучка используются для вычисления токовых добавок в концентрических обмотках коррекции среднего магнитного поля. Токи выставляются на источниках через цифро-аналоговые преобразователи.

Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения.

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

В первой главе приводятся основные соображения по методике и некоторым общим аспектам решения проблемы управления режимом ускорения, основной целью которого является получение на конечном радиусе циклотрона пучка с заданными свойствами (энергия, разброс энергии и т.п.). Для создания и стабилизации изохронного режима ускорения весьма целесообразно использовать зависимость фазы пролета от радиуса. Из соотношения между параметрами пучка и моноэнергетичностью ускоряемых частиц вытекают жесткие требования к точности хода фазы ($1-2^0$) и к азимутальной протяженности сгустков (меньше 5^0 для $\Delta E/E=10^{-3}$). Применение третьей гармоники ускоряющего воздействия может существенно понизить эти требования.

Применение управляющей ЦВМ в качестве цифрового регулятора в сложной системе управления непрерывным многомерным объектом обладает многими преимуществами перед классической аналоговой техникой. Меняя соответствующие программы, можно сравнительно легко менять алгоритмы работы всей системы. Управление циклотроном как объектом, не подвергающимся быстрым возмущениям, осуществляется в предложенной системе в циклах с ожиданием полного затухания переходного процесса после очередного итерационного шага. Это позволяет получить высокие точности регулирования без опасения возникновения неустойчивости процесса за счет неудовлетворительного синтеза сложного многомерного контура обратной связи с точки зрения его динамических свойств.

Приводится подробный матричный анализ предложенной системы управления циклотроном, которая в небольшой окрестности рабочей точки считается замкнутой, многомерной, линеаризованной, стационарной системой автоматического регулирования дискретного действия с астатизмом нулевого порядка.

Полученное уравнение состояния в векторно-матричном виде позволяет определить условия автономности и инвариантности. Выведены соответствующие уравнения в скалярной форме, удобной для практического применения. Поскольку на практике исходная информация о состоянии системы часто получается с некоторой ошибкой, в алгоритмах рабочих программ используется метод регуляризации некорректных задач для улучшения сходимости процесса управления и для ограничения управляющих воздействий в пределах заданной допустимой области.

Наконец, дается короткий перечень других методов, включая методы математического программирования, градиентные методы и разные методы случайного поиска.

Вторая глава посвящена анализу принципов работы индукционных датчиков свойств пучка в циклотронах. Датчики в виде проводящих пластин, находящихся в электрическом и магнитном полях ускоряемого пучка, рассматриваются как участки однородной линии с распределенными параметрами. Пучок представлен в виде движущегося сектора заряженной плоскости. Выведены общие уравнения для напряжения на выходе датчика в операторном виде

$$U(p) = \frac{E(p) v_0 Z_K [(Z_0 + Z_1) e^{p\tau} - (Z_0 - Z_1) e^{-p\tau} - 2Z_1] + J(p) Z_0 Z_K v_0 [(Z_0 + Z_1) e^{p\tau} + (Z_0 - Z_1) e^{-p\tau} - 2Z_0]}{p [(Z_0 + Z_1)(Z_0 + Z_K) e^{p\tau} - (Z_0 - Z_1)(Z_0 - Z_K) e^{-p\tau}]} \quad (1)$$

где оригиналы $E(t) = -b\partial V/\partial t$ и $J(t) = e\partial D/\partial t$, b и e - ширина и высота датчика, V и D - соответственно магнитная и электрическая индукции, возбуждаемые пучком в области датчика, v_0 и τ - скорость и время распространения поля вдоль датчика, Z_1 , Z_K и Z_0 - начальный, конечный и волновой импедансы датчика. Приведена таблица формул и переходных характеристик, полученных из (1) для индуктивных ($Z_1 = 0$), емкостных ($Z_1 = \infty$), смешанных ($Z_1 = Z_0$) датчиков дифференцирующего ($Z_K \approx Z_0$) и интегрирующего ($Z_K \gg Z_0$) типа с согласованными ($Z_K = Z_0$) и несогласованными ($Z_K \neq Z_0$) нагрузками. Для ограниченного диапазона частот применима эквивалентная схема датчика с сосредоточенными параметрами, описываемая более просто. Напряжение на датчике

$$U(p) = \frac{\rho (I_1(p)R_1 + E_1(p))}{1 + p(\tau_1 + \tau_2) + p^2\tau_0^2\rho} \quad (2)$$

где

$\rho = R_K / (R_1 + R_K)$, $\tau_1 = CR_1$, $\tau_2 = L / R_K$, $\tau_0 = \sqrt{LC}$, R_1 и R_K - начальное и конечное сопротивления датчика, C и L - полные емкости и индуктивности контура датчика, I_1 - суммарный ток и E_1 - эдс, введенные пучком во всей петле датчика.

С использованием метода запаздывающих потенциалов выведены исходные формулы для электрической и магнитной составляющих поля пучка в области датчика. Показано, что при скорости движения пучка $\beta < 0,3$ можно не учитывать влияние релятивизма. При бо-

лее высоких скоростях качество сигналов улучшается. Для произвольной формы пучка на датчиках интегрирующего типа (емкостный датчик с высокоомной нагрузкой R_k) получим напряжение

$$u_i(\varphi) = \frac{re}{2\pi c} \int_{-\eta/2}^{\eta/2} \left\{ \arctg(\varphi + \varepsilon + \frac{\vartheta}{2}) \frac{r\vartheta}{a} - \arctg(\varphi + \varepsilon - \frac{\vartheta}{2}) \frac{r\vartheta}{a} \right\} \sigma(\varepsilon, r) d\varepsilon \quad (3)$$

и для дифференцирующего типа (емкостный с низкоомной нагрузкой или индуктивный тип)

$$u_d(\varphi) = k_d \int_{-\eta/2}^{\eta/2} \left\{ \frac{1}{a^2 + (\varphi + \varepsilon + \frac{\vartheta}{2})^2 r^2 \gamma^2} - \frac{1}{a^2 + (\varphi + \varepsilon - \frac{\vartheta}{2})^2 r^2 \gamma^2} \right\} \sigma(\varepsilon, r) d\varepsilon, \quad (4)$$

где для емкостного датчика

$$k_d = \frac{ae\vartheta R_k}{2\pi} r\omega^2 \quad (5)$$

и для индуктивного

$$k_d = \frac{ab\gamma\mu_0}{2\pi} r^3\omega^2. \quad (6)$$

Здесь a - расстояние датчика от плоскости движения пучка, φ - угол между осями пучка и датчика, r - радиус, на котором находится датчик, $\gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2}$, $\sigma(\varepsilon, r)$ - функция распределения плотности заряда в пучке, полная азимутальная протяженность которого равна η , $\vartheta = l/r$, l - длина датчика.

После анализа свойств датчиков с точки зрения отношения полезного сигнала к наводке вычисляются и сравниваются формы сигналов при нормальном распределении плотности заряда в сгустке по закону

$$\sigma(r, \varepsilon) = I_s \frac{h(r)\sqrt{2\pi}}{\omega r \lambda} e^{-\frac{\varepsilon^2}{2\lambda^2}}, \quad (7)$$

где I_s - средний ток пучка, ω - круговая частота вращения пучка, λ - параметр нормального распределения, $h(r)$ - плотность орбит на радиусе r .

Полученные формы сигналов $u_i(\varphi)$ и $u_d(\varphi)$ для интегрирующего и дифференцирующего датчиков циклотрона У-120М приведены в виде графиков. Приведены также графики зависимостей от радиуса амплитуд сигналов отдельных типов датчиков на У-120М и на ЭМКЦ. Из приведенной таблицы чувствительностей датчиков в разных режимах работы циклотрона У-120М следует, что самый большой

диапазон изменения амплитуд получен для индуктивного ($I:380$), лучший у емкостного дифференцирующего ($I:32$) и наилучший у интегрирующего ($I:5$) типов датчиков. По сравнению с другими типами интегрирующий датчик, кроме максимальной чувствительности, обладает и наилучшим соответствием формы сигнала форме сгустка.

Наконец, приведены частотные спектры сигналов интегрирующего и дифференцирующего типов и виды соответствующих сигналов, вычисленных с учетом частотных искажений за счет ограниченной полосы пропускания в.ч. тракта. На примере датчика для У-120М показано, что для получения сдвига фазы меньше 1° надо обеспечить полосу пропускания больше 10^9 Гц.

Третья глава посвящена автоматической обработке сигналов с индукционных датчиков при помощи серийного стробоскопического осциллографа ОSA-60I и управляющей ЦВМ [2]. Созданная система вместе с программным обеспечением применима не только для данной задачи, но и для обработки любых сигналов, поддающихся стробоскопическому преобразованию.

Сигнал, находящийся на входе открытого по команде ЦВМ канала электронного коммутатора, поступает на вход осциллографа. Амплитуды выборок сигнала, выводимых из низкочастотного тракта осциллографа, кодируются и вводятся в ЦВМ. Возможность быстрого отключения всех входов коммутатора позволяет во время первичной обработки учитывать также коды, соответствующие нулевому уровню входе осциллографа. Система может измерять и сравнивать два процесса с временным разрешением около 0,015 нс.

Разработаны два метода измерения фазы пролета [3,6]. В первом фазе определяется по геометрическому положению характерной точки сигнала относительно опорного напряжения, полученного от в.ч. системы питания дуанта. Вход стробоскопического осциллографа коммутируется таким способом, что на экране и в соответствующих массивах памяти ЦВМ изображаются по краям участки опорного напряжения, определяющие полпериода, а в середине - сигнал, фаза которого вычисляется (рис. 2). Во втором, более сложном методе, выделяется фаза и амплитуда второй гармоники сигнала с использованием численного анализа Фурье. Для вычислений вводится в память ЦВМ изображение сигнала и опорного напряжения за целый период (рис. 3). Основное преимущество этого метода состоит в существенном подавлении влияния наводки от в.ч. ускоряющего напряжения на точность измерения.

Погрешность работы аппаратуры в режиме измерения сдвига фазы получена для стандартных сигналов около $\pm 0,1^\circ$, для сигналов индуктивных датчиков на ЭМКЦ в зависимости от качества сигналов - около 2° .

В четвертой главе выведены основные соотношения, необходимые для вычисления оптимальных токов в концентрических обмотках. Исходя из известной зависимости сдвига фаз между двумя радиусами

$$\sin\varphi(R_i) - \sin\varphi(R_0) = - \frac{2\pi E_0}{\Delta W H_{s0} r_\infty^2} \int_{R_0}^{R_i} \{H(r) - H_s(r)\} S(r) r dr \quad (8)$$

и полагая, что фаза пучка $\varphi(R_0)$ на радиусе инжекции R_0 не зависит от поведения магнитного поля $H(r)$, получим для любого радиуса R_i зависимость сдвига фазы от суммы добавок токов в n обмотках в виде

$$\Delta \sin\varphi(R_i) = \sum_{j=1}^n G_{ij} \Delta I_j, \quad (9)$$

где

$$G_{ij} = - \frac{2\pi E_0}{\Delta W H_{s0} r_\infty^2} \int_{R_0}^{R_i} g_j(r) S(r) r dr. \quad (10)$$

Зависимость магнитного поля от тока в j -той обмотке $g_j(r) = \frac{\Delta H(r)}{\Delta I_j}$ либо вычисляется по геометрическим данным (ЭМКЦ), либо получается обработкой магнитных измерений (У-И20М). Коэффициенты G_{ij} можно также получить прямым измерением на действующем циклотроне, используя соотношение $G_{ij} = \Delta \sin\varphi(R_i) / \Delta I_j$.

Минимизируя функционал

$$F = \sum_{i=1}^m \left\{ \sum_{j=1}^n G_{ij} \Delta I_j - \Delta \sin\varphi(R_i) \right\}^2 + \sum_{j=1}^n (\alpha_j \Delta I_j)^2 \quad (11)$$

получим в соответствии с выводами в первой главе систему n уравнений с n неизвестными, в которой p -тое уравнение имеет вид

$$\sum_{j=1}^n \Delta I_j \left(\sum_{i=1}^m G_{ip} G_{ij} \right) + \alpha_p^2 \Delta I_p = \sum_{i=1}^m G_{ip} \Delta \sin\varphi(R_i), \quad (12)$$

где α_p - экспериментально подобранные коэффициенты регуляризации. В результате решения этой системы получаются оптимальные токи, минимизирующие значение функционала F . Предусмотрено

введение в систему условия сохранения магнитного поля на радиусе инжекции, вблизи которого, как правило, индукционные датчики не могут обеспечить достоверной информации о фазе пролета.

Предлагаются методы калибровки системы измерения фазы пролета, использующие нелинейную зависимость сдвига фазы либо при изменениях тока в одной из корректирующих обмоток, либо при изменениях амплитуды ускоряющего напряжения. Оценка достижимой точности калибровки показывает, что использование пробных скачков тока в выбранной обмотке может при достаточно больших возмущениях фазы обеспечить точность калибровки системы, сравнимую с величиной случайной ошибки измерения фазы пролета.

При подготовке алгоритма управления циклотроном еще до начала работы с реальным объектом выгодно исследовать поведение системы с использованием математического моделирования на ЦВМ.

В пятой главе описывается программное обеспечение такой задачи, методика и результаты исследований, выполненных для циклотрона У-И20М. Комплекс программы, названный СУКЛО, обеспечивает выполнение всех нужных процедур, включая обработку заранее измеренных топографий магнитного поля и перфорирование ленты с коэффициентами передаточных матриц, нужными для применения в рабочей программе.

Математическая модель циклотрона с точки зрения фазового движения представляется в виде системы уравнений

$$\Delta \sin\varphi(R_i) = \sum_{j=1}^n G_{ij} \delta_c (1 + c_F \cdot RND(j)) \cdot \Delta I_j, \quad (13)$$

где $RND(j)$ - случайная величина с равномерным распределением плотности вероятности в области $\langle -1, 1 \rangle$, δ_c и c_F - коэффициенты систематической и случайной ошибок, имитирующие в математической модели отличие предполагаемого состояния циклотрона от действительного.

В модуле обработки фазы предусмотрена возможность сглаживания зависимости фазы пролета от радиуса, возмущенной за счет случайных ошибок измерения. В отличие от программного обеспечения системы управления действительным циклотроном в реальном масштабе времени, программа СУКЛО содержит модули, позволяющие в течение имитированного процесса управления вычислять отклонение и градиенты магнитного поля.

С применением программы СУКЛО выполнен ряд вычислений, имитирующих процесс управления фазой пролета на У-120М в разных условиях. Систематически исследовалось влияние разных факторов на сходимость процессов и точность полученной фазы. Особенно вредным оказалось влияние случайных ошибок, введенных с помощью коэффициента C_F . Благоприятно воздействовали процедура сглаживания фазы и введение коэффициентов регуляризации α . Выбор оптимальных значений α обеспечивает, наряду с более равномерной сходимостью, и минимальные градиенты отклонений магнитного поля, и тем самым предупреждает возможность разрушения устойчивого процесса ускорения. В тех случаях, когда токи в некоторых обмотках в результате вычислений выходили бы за пределы допустимой области, вычисление повторяется. При этом токи в соответствующих обмотках фиксируются на прежних значениях с применением достаточно больших значений соответствующих α . После получения удовлетворительного решения восстанавливаются рабочие значения всех α .

Программа СУКЛО, оснащенная диспетчерским модулем интерактивного режима работы оператора с системой, позволяет быстро менять конфигурацию системы с произвольным набором корректирующих обмоток. Влияние структуры обмоток на точность управления фазой пролета также исследовалось для У-120М, где в цепь обратной связи включалось постепенно 5, 8, 12 и 15 обмоток с примерно равномерным распределением вдоль радиусов. В системе с 16-тью фазовыми датчиками при сравнительных вычислениях и в случае одинакового исходного состояния системы со средним отклонением фазы 40° получены средние отклонения фаз $4,5^\circ$, 3° , $0,8^\circ$ и $0,8^\circ$ соответственно. Получение одинаковых точностей для 12 и для 15 обмоток может быть объяснено ограниченной точностью (7 десятичных разрядов) вычислений при обращении матриц столь высокого порядка.

Из результатов всех вычислений, выполненных для У-120М, следует вывод о том, что при данной структуре корректирующих обмоток и фазовых датчиков можно ожидать получения точности фазы пролета в среднем не хуже 2° .

В начале шестой главы дается короткое описание экспериментальной проверки основных выводов, полученных в предыдущих разделах диссертации. Электронная модель релятивистского циклотрона ЭМКЦ ускоряла пучок электронов интенсивностью больше 100 мкА до энергии около 400 кэВ. Среднее магнитное поле восьмисекторной

спиральной структуры автоматически формировалось с помощью 8 обмоток грубой коррекции, равномерно распределенных вдоль радиусов в диапазоне с 35 до 105 см. ЦВМ типа М 6000/1 с памятью 8 тысяч 16-разрядных слов устанавливала токи в источниках питания корректирующих обмоток через ЦАП с точностью, соответствующей отклонениям магнитного поля $\Delta H/H$ около 10^{-4} . Фаза пролета измерялась на радиусах от 55 до 99 см с помощью 12 индуктивных датчиков способом, описанным в третьей главе диссертации.

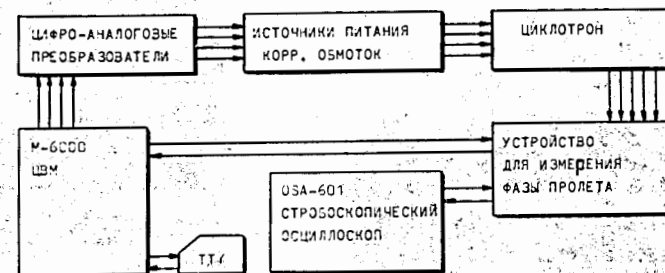


Рис. 1. Блок-схема системы управления

Для исследования системы управления на действующем циклотроне (рис. 1) создано программное обеспечение модульной структуры, позволяющее конфигурировать разные варианты рабочих программ. Модуль программного диспетчера в каждой программе обеспечивал либо интерактивный режим работы оператора с системой, либо автоматическое выполнение заданной последовательности задач в конечных или непрерывно повторяющихся циклах.

Программа ПКАР служила для проверки системы измерения фазы пролета с применением методов вычисления фаз либо по геометрической форме сигнала (рис. 2), либо по его второй гармонике (рис. 3). Сравнительные измерения с применением обоих методов производились на пучке, взимутальная протяженность которого составляла около 50° . В широком диапазоне углов получена разница измеренных ходов фазы в несколько градусов. На рис. 4 показан вид сигналов от всех датчиков для фазы, стабилизированной вблизи фазы максимального напора энергии.

Программа САЛВ использовалась для осуществления автоматической калибровки системы измерения фазы пролета пучка и для автоматического измерения матриц передаточных коэффициентов на дей-

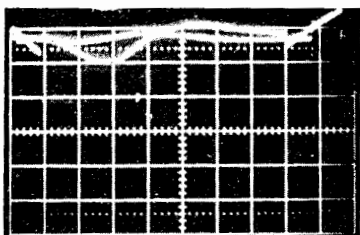


Рис. 2. Изображение участков опорного напряжения и фазового сигнала (вычисление фазы по геометрической форме).

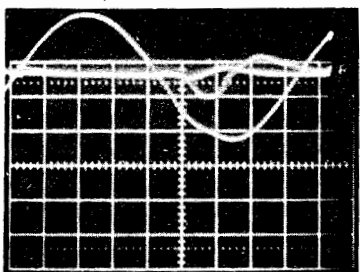


Рис. 3. Изображение сигнала и опорного напряжения (метод численного анализа Фурье).

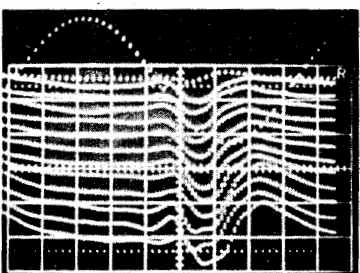


Рис. 4. Сигналы от 12 фазовых датчиков на ЭМКЦ (фаза стабилизирована вблизи 45°).

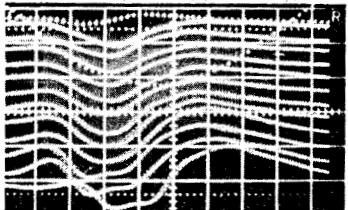
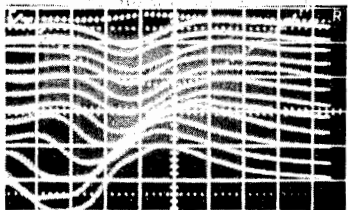
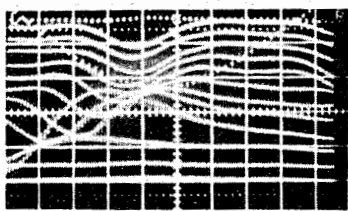
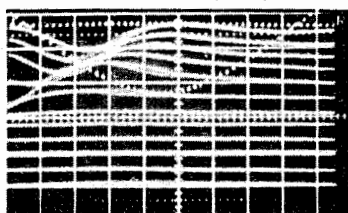
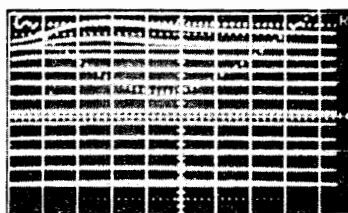


Рис. 5. Процесс проводки пучка на циклотроне ЭМКЦ.

ствующем циклотроне способами, теоретическое обоснование которых изложено в 4-й главе. В результате выполненных измерений получена перфолента с соответствующими матрицами в виде, подходящем для применения в рабочей программе MDL 75. По данным экспериментальных измерений видно, что действительная чувствительность фазы к токам в корректирующих обмотках несколько выше по сравнению с расчетной.

Программа MDL 75 является основной рабочей программой, осуществляющей автоматическое управление. При практическом исследовании системы на ЭМКЦ получены выводы, соответствующие результатам математического моделирования. При первых же экспериментах наблюдалась тенденция стабилизации фаз, однако интенсивность пучка уже после третьей итерации существенно уменьшилась, очевидно, из-за недопустимо больших градиентов магнитного поля, создаваемых в результате значительных знакопеременных регулирующих добавок тока в корректирующих обмотках (рис. 6). Применение процедуры сглаживания при обработке измеренной зависимости фазы от радиуса и применение более точных матриц при вычислениях помогли добиться устойчивого процесса управления без потери пучка. Существенно более надежная работа системы была получена после введения экспериментально подобранных коэффициентов α (рис. 7). Система работала устойчиво даже при ошибках передаточных коэффициентов, достигающих 30%. При многочисленных испытаниях режима управления экспериментально получены зависимости хода фазы со средним отклонением от заданного закона около 2° (рис. 9). Среднее время одного итерационного шага (измерение фазы, расчет токов коррекции, установление нового режима) около 20 с.

Для установления исходного режима при пуске циклотрона или после больших возмущений некоторых параметров, когда пучок на большей части радиусов отсутствует, алгоритм управления оснащен модулем, обеспечивающим автоматическое проведение пучка от области первых датчиков фазы до конечного радиуса ускорения. При обработке фазовых измерений в части массива фаз, соответствующей радиусам без пучка, записывается значение последней измеренной фазы. Система управления на основе такой информации в результате первой итерации приводит фазу в начальных радиусах близко к заданной, и пучок проводится далее. Как правило, в течение трех-четырёх таких шагов можно получить режим ускорения, близкий к

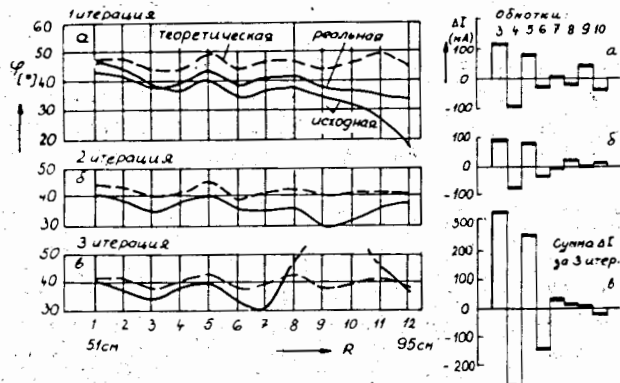


Рис. 6. Три итерации неустойчивого процесса управления фазой пролета на циклотроне ЭМКЦ. В правой части рисунка показаны соответствующие добавки токов в обмотках коррекции магнитного поля ускорителя.

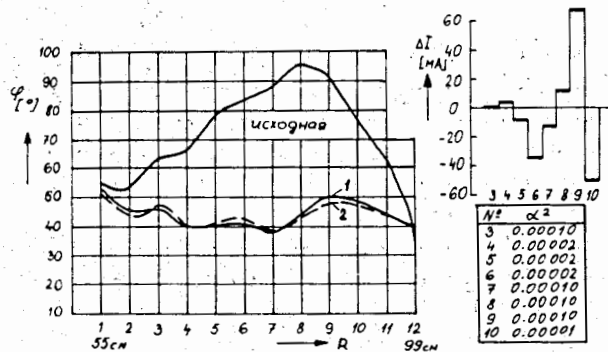


Рис. 7. Две итерации устойчивого процесса автоматического управления с применением метода регуляризации. Удовлетворительная точность коррекции фазы получена при существенно меньших токовых добавках, не проявляющих знакопеременного характера.

изохронному с отклонением фазы, не превышающим на всех радиусах $\pm 5^\circ$ (рис. 8). Осциллограммы, иллюстрирующие этот процесс, показаны на рис. 5.

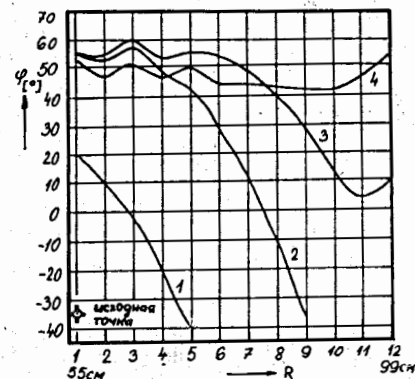


Рис. 8. Пример проводки пучка на ЭМКЦ.

Соответствующее внимание уделялось не только состоянию фазы пролета, но и зависимости от радиуса интенсивности пучка, которая, однако, не входила непосредственно в целевую функцию оптимального управления. При продолжительной работе системы с фазой пролета, стабилизированной вблизи фазы максимального набора энергии, не наблюдалось увеличения потерь пучка, обусловленного воздействием системы управления (рис. 10). Однако все-таки часть пучка в процессе ускорения терялась, причем это явление нельзя было объяснить фазовыми потерями. Программа POKUS была создана для случайного поиска такого магнитного поля, а соответственно и такой зависимости фазы пролета от радиуса, при которых минимизировались бы потери пучка в процессе ускорения. В результате нескольких экспериментов, выполненных с данной программой на ЭМКЦ, получены взаимно подобные зависимости фазы от радиуса, по характеру близкие зависимостям, получаемым раньше при ручной настройке циклотрона на режим с минимальными потерями пучка.

Все вычислительные работы, а также задачи, выполняемые в реальном масштабе времени, выполнялись на ЦВМ системы АСВТ типа М-6000, которая оказалась подходящей для решения задач подобного вида. Единственным существенным недостатком являлось от-

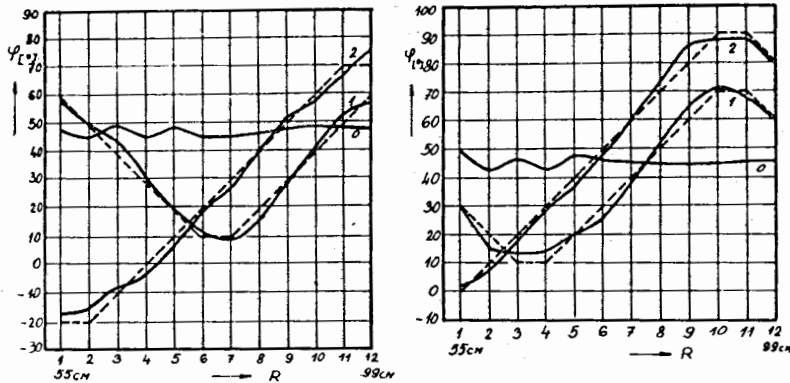


Рис. 9. Управление режимом ускорения при разных зависимостях заданной фазы от радиуса (кривые 1 и 2) при исходной фазе (кривая 0), стабилизированной вблизи фазы максимального набора энергии за оборот (для ЭМКЦ 45°).

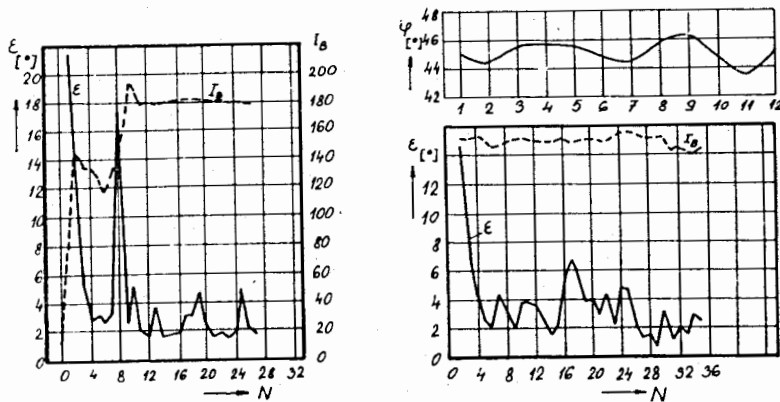


Рис. 10. Поведение показателей ошибки фазы пролета $\epsilon = \sqrt{\frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} \Delta\varphi_i^2}$ и среднего тока пучка $I_B = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} I_{B_i}$ в процессе управления. Большие всплески ϵ при номерах итерационного шага $N=8$ и $N=16$ вызваны внешними возмущениями. Один из наиболее благоприятных случаев зависимости фазы от радиуса показан вверху.

сутствие внешнего запоминающего устройства, которое при выполнении ряда задач в нормальной эксплуатации циклотрона использовалось бы для хранения и быстрой перезагрузки программ и массивов данных. При развитии программного обеспечения задачи управления встречались серьезные трудности с недостатком памяти для загрузки всех нужных программных модулей. Все программы написаны на Фортране за исключением подпрограмм обслуживания нестандартных устройств в/в, которые написаны в виде модулей на Ассемблере, совместимых с Фортраном.

Для более быстрой подготовки новых программ на М-6000 с объемом памяти 16К и более при отсутствии магнитного диска, было создано улучшенное математическое обеспечение, состоящее из модифицированных модулей Ассемблера, Фортрана, Бейсика, Редактора. Получена существенная экономия перфоленги и времени трансляции за счет использования верхней части памяти в качестве буферного запоминающего устройства. Предусмотрено управление работой трансляторов во время транслирования с помощью кнопочного регистра на панели управления ЦВМ.

В заключении констатируется, что управление режимом ускорения в изохронных ускорителях по фазе пролета пучка с применением управляющей ЦВМ в цепи обратной связи является весьма перспективным направлением совершенствования этих ускорителей. Основные итоги описанных в диссертации работ сводятся к следующему:

1. Проведен анализ режимов работы индукционных датчиков фазы пролета пучка в циклотроне. Рассмотрено влияние собственных параметров датчиков и ограниченной полосы пропускания в.ч. тракта на искажение фазовых сигналов. Предложен тип датчика с наилучшей переходной характеристикой. Получены формулы и зависимости, полезные при выборе подходящего типа датчика для работы в конкретных условиях.

2. Разработана и введена в эксплуатацию система автоматической обработки фазовых сигналов, основанная на применении серийного стробоскопического осциллографа и управляющей ЦВМ.

3. Предложен и введен в эксплуатацию способ автоматической калибровки тракта измерения фазы пролета.

4. Разработана и на практике применена система автоматического измерения матриц передаточных коэффициентов на работающем циклотроне.

5. Создан алгоритм вычисления оптимальных токов коррекции, позволяющий существенно понизить неблагоприятное влияние неточностей исходной информации на сходимости процесса управления.

6. Написаны программы, позволяющие проводить предварительную подготовку и отладку рабочих программ управления любым циклотроном на основании заранее измеренных вкладов отдельных обмоток в общее магнитное поле. Обеспечена предварительная проверка возмущений магнитного поля, возникших в процессе управления.

7. Предложен и опробован эффективный способ вычисления оптимальных управляющих воздействий, область допустимых значений которых может быть ограничена практически любыми условиями.

8. При многочисленных экспериментах исследовались детерминированные методы управления на действующем циклотроне ЭМКЦ, в котором при помощи 12 фазовых датчиков и 8 корректирующих обмоток получено среднее квадратичное отклонение фазы пролета от заданного закона порядка 2^0 .

9. Найден и опробован способ автоматической проводки пучка от области первых датчиков фазы до области конечных радиусов ускорения.

10. Опробован метод случайного поиска режима ускорения, оптимального с точки зрения минимальных потерь пучка.

11. Путем математического моделирования исследована система управления режимом ускорения на циклотроне У120М. Полученные результаты позволяют ожидать, что созданная система управления обеспечит точность фазы пролета около $1-2^0$.

Основные результаты, приведенные в диссертации, доложены на международных конференциях по циклотронам /1, 5/, а также опубликованы в 6 печатных работах.

Литература

1. В.Н.Аносов, Ю.Н.Денисов, А.А.Любенко, М.Чигак. Система управления изохронного циклотрона У 120М. "Материалы III совещания по изохронному циклотрону У 120М", Ческе Будейовице, ЧССР, 1973, ОИЯИ, Р9-7339, Дубна, 1973.
2. Ю.Н.Денисов, А.Н.Любенко, М.Чигак, Метод автоматической обработки временных характеристик одинаково повторяющихся процессов с помощью ЦВМ. ОИЯИ, Р9-9143, Дубна, 1975.
3. Ю.Н.Денисов, А.Н.Любенко, М.Чигак, Автоматическое измерение фазы пролета пучка в циклотроне. ОИЯИ, Р9-9142, Дубна, 1975.
4. В.Н.Аносов, Ю.Н.Денисов, А.В.Калмыков, А.Н.Любенко, Д.Л.Новиков, М.Чигак, Автоматическое управление фазой пролета пучка в изохронном циклотроне. ОИЯИ, Р9-9144, Дубна, 1975.
5. V.N.Anosov, M.Chihak, Yu.N.Denisov, A.V.Kalmykov, A.N.Lubenko, The System of Automatic Beam Phase Measuring and Control for the Isochronous Cyclotron. Seventh International Conference on Cyclotrons and their Applications, Zürich, 1975, p. 62.
6. Ю.Н.Денисов, А.Н.Любенко, М.Чигак, Автоматическое измерение фазы пролета пучка в циклотроне. ПТЭ, 1976, № 5, 35.

Рукопись поступила в издательский отдел
28 февраля 1977 года.