

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

ДУБНА



СЗУЧ.Зме

A-695

P9 - 9144

3/41-

В.Н.Аносов, Ю.Н.Денисов, А.В.Калмыков,
А.Н.Любенко, Д.Л.Новиков, М.Чигак

4273/2-75

АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ
ФАЗОЙ ПРОЛЕТА ПУЧКА
В ИЗОХРОННОМ ЦИКЛОТРОНЕ

1975

P9 - 9144

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



Изохронный циклотрон с регулируемой энергией с точки зрения управления является сложным многопараметрическим объектом. Для того, чтобы провести пучок без фазовых потерь во всем диапазоне радиусов ускорения, необходимо (наряду с выполнением ряда других условий) определять с достаточно высокой точностью величины токов в корректирующих обмотках, исправляющих среднее поле циклотрона. Для получения пучка с высокой степенью моноэнергетичности величина фазового дрейфа вдоль радиуса должна быть весьма малой (порядка нескольких градусов). Требования к настройке токов коррекции в этом случае становятся настолько высокими, что их невозможно удовлетворить без привлечения средств вычислительной техники /1/.

В настоящей работе описывается система автоматического управления, построенная на базе ЦВМ и обеспечивающая создание и поддержание такого режима ускорения. Блок-схема системы приведена на рис. 1.



Рис. 1. Блок-схема системы управления фазой пролета.

$$\sum_{j=1}^n G_{ij} \Delta I_j = \Delta \sin \phi (R_i) = \psi_i, \quad (8)$$

$$\sum_{j=1}^n g_j (R_0) \Delta I_j = H(R_0) - H_{из} (R_0) = \psi_{m+1}.$$

Поскольку на практике $m > n$, то система (8) является несовместной системой уравнений. Решается она с помощью минимизации функционала:

$$F = \sum_{i=1}^{m+1} \epsilon_i^2 + \sum_{j=1}^n (a_j \Delta I_j)^2, \quad (9)$$

где ϵ_i - разность левой и правой частей уравнения (8), a_j - экспериментально подбираемые коэффициенты. Дифференцируя (9) по ΔI_j и приравнявая производные к нулю, получим систему, в которой число неизвестных равно числу уравнений. Произвольное p -тое уравнение этой системы имеет вид

$$\sum_{j=1}^n \Delta I_j \left(\sum_{i=1}^{m+1} G_{ij} G_{ip} \right) + a_p^2 \Delta I_p = \sum_{i=1}^{m+1} G_{ip} \psi_i. \quad (10)$$

Решая систему (10), получаем величины токовых добавок, минимизирующих отклонения измеряемых фаз на различных радиусах - $\phi(R_i)$ от их требуемых значений $\phi^*(R_i)$. Коэффициенты a_j ограничивают величину корректирующих токовых добавок ΔI_j , несколько ухудшая при этом точность коррекции фазы. Без учета этих коэффициентов в (10) наблюдались случаи потери пучка в процессе коррекции фазы на ускорителе даже при хорошей зависимости фазы пролета от радиуса, что можно, видимо, объяснить возникновением недопустимых с точки зрения устойчивости движения величин градиентов среднего магнитного поля на некоторых радиусах ускорения из-за больших токовых добавок ΔI_j .

Элементы матрицы G_{ij} могут либо определяться теоретически по формуле (6), либо получаться из непосредственных измерений фазы пролета на ускорителе с использованием соотношения $G_{ij} = \frac{\partial [\Delta \sin \phi(R_i)]}{\partial (\Delta I_j)}$. Из-

меренные величины G_{ij} оказались примерно на 30% больше расчетных. Это расхождение можно объяснить большой азимутальной протяженностью сгустков ускоряемых частиц, в то время как формула (5) справедлива для точечного заряда. Следует, однако, отметить, что даже при таких неточностях в отыскании коэффициентов матрицы G_{ij} система коррекции фазы работала удовлетворительно, что очень важно с точки зрения успешного решения задачи управления по фазе в циклотронах, в которых железное ярмо будет вносить некоторые нелинейные искажения в коэффициенты матрицы G_{ij} .

Поскольку время, затрачиваемое на измерение фазовой картины вдоль радиуса ускорителя и на расчет корректирующих добавок токов, на несколько порядков превышает постоянные времени контуров управляющих обмоток ускорителя (на электронном ускорителе, на котором проводилась коррекция фазы, из-за отсутствия железного ярма постоянная времени контура катушки составляет $\approx 0,5$ мс), цепь обратной связи системы автоматического управления по фазе пролета можно рассматривать как статическую многомерную систему, не анализируя динамику переходных процессов. Использование ЦВМ в качестве регулирующего элемента в системе автоматического управления фазой пролета позволило обеспечить возможность создания самых разнообразных режимов работы путем разработки соответствующего программного обеспечения для управляющей ЦВМ при сохранении достаточно высокой скорости выполнения коррекции фазы.

Блок-схема основной рабочей программы для управления фазой пролета показана на рис. 2. Программа состоит из ряда отдельных частей, которые вызываются оператором с помощью подпрограммы - диспетчера DISP. Используя подпрограмму CYCLE, оператор может организовать конечные или непрерывные автоматические циклы, состоящие из любого требуемого сочетания задач, решаемых подпрограммами. Задачи, решаемые отдельными подпрограммами, могут быть модифицированы с помощью параметров, вводимых оператором в ЦВМ с телетайпа, либо переключением кнопок ключевого ре-

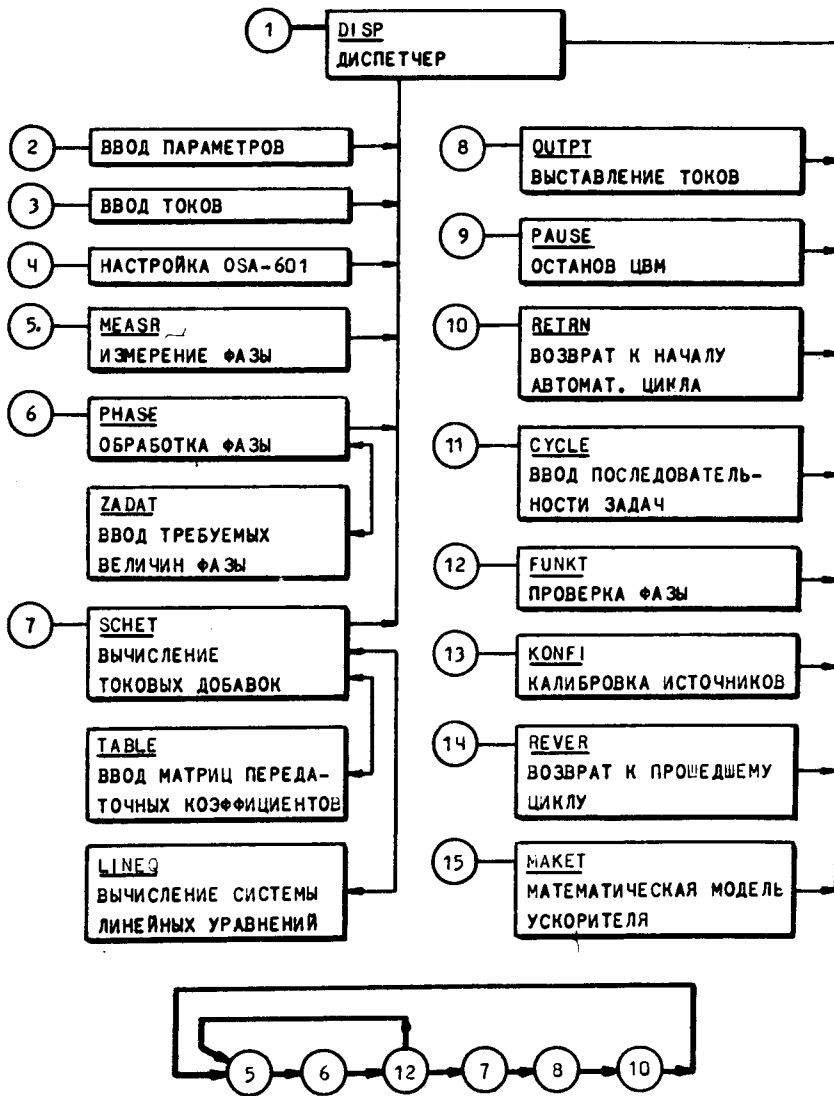


Рис. 2. Блок-схема программы для управления фазой пролета.

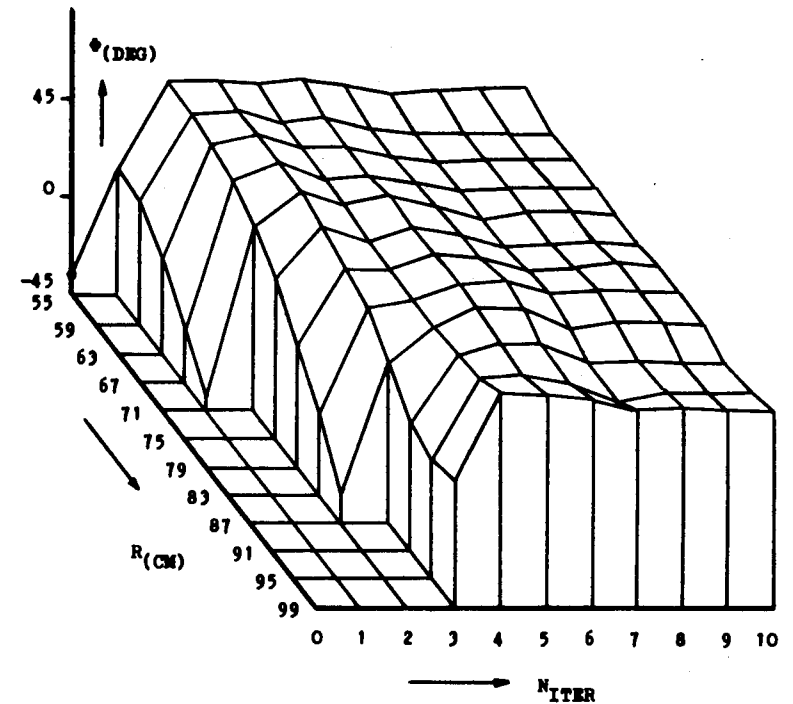


Рис. 3. Диаграмма проводки пучка.

гистра на панели ЦВМ при выполнении вычислителем данных подпрограмм. Цифры, указанные на рис. 2, означают номера меток в тексте программ, написанном на языке ФОРТРАН. На рис. 2 внизу показан пример непрерывного цикла, создающего режим автоматической стабилизации фазы пролета. Обращение по метке 5 вызывает исполнение подпрограммы MEASR, которая осуществляет считывание сигналов с датчиков фазы, их преобразование и ввод в ЦВМ. Через метку 6 происходит обращение к подпрограмме PHASE, с помощью которой измеренная фаза сравнивается с заданной в различных точках по радиусу ускорителя и вычисляется функционал от фазовых ошибок, по величине которого подпрограмма FUNKT(12) решает, либо продолжать

измерения (в случае удовлетворительного по величине расхождения измеренной и заданной фазы пролета), либо произвести коррекцию фазы. Расчет корректирующих токов происходит в подпрограмме SCHET (7) и LINEQ с использованием заранее вычисленных по формуле (6) элементов матрицы G_{ij} . Выше отмечалось, что элементы матрицы G_{ij} могут быть также получены путем измерений на ускорителе. Вычисленные добавки суммируются с ранее установленными на источниках значениями с помощью подпрограммы OUTPT (8) и метка 10 обеспечивает переход на начало цикла, 5 - измерение новой фазы после произведенной коррекции.

Программа содержит также вспомогательные подпрограммы. Подпрограмма REVER (14) позволяет быстро восстановить исходный режим, подпрограмма МАКЕТ (15) представляет математическую модель ускорителя с точки зрения описания фазового движения. Применение подпрограммы МАКЕТ целесообразно при отладке программ, исследовании новых режимов работы, а также при экспериментальном подборе некоторых параметров системы управления перед выходом на реальный ускоритель.

Оператор, в случае необходимости, может получать на телетайпе следующую информацию:

- а) Текущий номер коррекции.
- б) Величины токов, установленных к моменту запроса в катушках коррекции.
- в) Фазы пучка на отдельных радиусах.
- г) Интенсивность пучка на различных радиусах.
- д) Величины показателей, по которым оценивается качество управления в каждом цикле коррекции. К ним относятся:

показатель ошибки фазы - Φ :

$$\Phi = \sqrt{\frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} \Delta\phi_i^2}$$

показатель величины токовых добавок

$$\delta I = \sqrt{\frac{1}{8} \sum_{j=1}^8 \Delta I_j^2}$$

показатель величины тока пучка

$$I_n = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} I_{ni}$$

Здесь $\Delta\phi_i$ - отклонение фазы от заданного значения на i -том радиусе, получаемое с помощью подпрограммы PHASE, ΔI_j - корректирующая добавка к току в j -ой катушке, I_{ni} - величина, пропорциональная интенсивности пучка на i -том радиусе.

Система автоматического управления фазой пролета была задействована на электронном циклотроне с жесткой фокусировкой Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ в декабре 1974 года. В процессе длительных испытаний в различных режимах работы циклотрона величина показателя ошибки фазы была в среднем равна $2-3^\circ$. Разработанное для системы управления по фазе пролета программное обеспечение позволяет получить т.н. "режим проводки пучка", при котором пучок доводится с заданной фазой до конечного радиуса ускорения даже в тех случаях, когда в исходном состоянии частицы ускорялись только до радиуса первого фазового датчика - 55 см. Пример выполнения режима проводки пучка на электронном циклотроне показан на рис. 3. По вертикальной оси отложена фаза пучка, по горизонтальным осям - радиус расположения пикап-электродов и порядковые номера коррекций фазы пролета. Пучок в исходном состоянии доходит до радиуса первого пикап-электрода с фазой (-35°), близкой к фазе замедления, которая на рассматриваемом электронном циклотроне составляет (-45°). После первой коррекции область ускорения распространяется до радиуса 75 см, и в результате третьей коррекции пучок доводится до конечного радиуса - 99 см. При последующих коррекциях фаза пролета делается равной фазе максимального набора энергии (на электронном циклотроне она равна $+45^\circ$). Один цикл коррекции фазы занимает время порядка 25 с, из которых 12 с приходится на измерение фазы в режиме максимальной точности, остальное время - на расчет корректирующих токовых добавок. В процессе испытаний система автоматического управления фазой пролета показала высокую надежность и устойчивость при наличии возмущений различного характера.

Авторы благодарят В.В.Кольгу, Н.Л.Заплатина, И.Н.Силина, Л.М.Онищенко и С.Б.Ворожцова за полезные дискуссии, А.Г.Комиссарова, А.С.Устинова, А.П.Агудина – за обеспечение бесперебойной работы ускорителя в процессе экспериментов.

Авторы выражают признательность В.П.Дмитриевскому за постоянное внимание и интерес к данной работе.

Литература

1. Sixth Int. Cycl.Conference, Vancouver, 1972, 543.
2. В.Н.Аносов и др. Препринт ОИЯИ, Р9-3787, Дубна, 1968.
3. В.Н.Аносов и др. Препринт ОИЯИ, Р9-7339, Дубна, 1973.
4. A.A.Garren. Nucl.Instr.&Meth., 18-19, 309 (1962).

Рукопись поступила в издательский отдел
2 сентября 1975 года.