

СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА



С 344, З 216

А-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.

Система управления была отлажена и испытана на электронном ускорителе Лаборатории ядерных проблем<sup>/2/</sup>. Пучок электронов ускоряется на данном ускорителе до энергии порядка 500 кэВ в диапазоне радиусов 18–100 см. Информация о фазе пролета пучком ускоряющей щели 90° дуанта снимается с помощью 12 индуктивных датчиков, расположенных внутри камеры на радиусах от 55 до 99 см с одинаковым шагом (4 см). Сигналы от датчиков после стробоскопического преобразования поступают в ЦВМ типа М-6000, где происходит вычисление величины фазы пролета относительно ускоряющего напряжения<sup>/3/</sup>. Наблюдаемые отклонения фазы от заданного закона используются для расчета оптимальных добавок токов коррекции магнитного поля. Новые значения токов коррекции устанавливаются на 8 источниках при помощи 10-разрядных ЦАП, подключенных к интерфейсным картам ЦВМ. Корректирующие обмотки находятся на радиусах 35–105 см.

Для вычисления токовых добавок используется формула, упрощенно описывающая фазовое движение в изохронном циклотроне<sup>/4/</sup>:

$$\sin \phi(R_i) - \sin \phi(R_0) = -k \int_{R_0}^{R_i} [H(r) - H_{\text{из}}(r)] S(r) r dr,$$

где  $\phi(R_i)$  и  $\phi(R_0)$  – фазы на  $i$ -том радиусе  $R_i$  и радиусе инжекции  $R_0$  соответственно;  $[H(r) - H_{\text{из}}(r)]$  – отклонение реального магнитного поля от изохронного закона;  $S(r) = 1 + \sigma(r) + r\sigma'(r)$  – функция, учитывающая увеличение длины орбиты по сравнению с круговой;  $k = \frac{2\pi E_0}{\Delta W H_0 \int_{R_0}^{\infty} r^2 dr}$ ;  $H_0$  – изохронное поле в центре ускорителя;  $E_0$  – энергия покоя ускоряемой частицы;  $\Delta W$  – максимальный набор энергии за оборот.

Если учесть, что на радиусе инжекции  $R_0$  фаза пучка не зависит от магнитного поля, то для некоторого поля  $H^*(r)$ , отличающегося от  $H(r)$ , можно переписать (1) в виде

$$\sin \phi^*(R_i) - \sin \phi(R_0) = -k \int_{R_0}^{R_i} [H^*(r) - H_{\text{из}}(r)] S(r) r dr, \quad (2)$$

где  $\phi^*(R_i)$  – фаза на радиусе  $R_i$ , соответствующая новой зависимости поля  $H^*(r)$  от радиуса.

Вычитая (1) из (2), получим формулу

$$\sin \phi^*(R_i) - \sin \phi(R_i) = -k \int_{R_0}^{R_i} [H^*(r) - H(r)] S(r) r dr. \quad (3)$$

Поле в произвольной точке по радиусу  $r$  при известных токах в  $n$  отдельных катушках  $I_j$  определяется так:

$$H(r) = \sum_{j=1}^n g_j(r) I_j, \quad (4)$$

где  $g_j(r)$  – магнитное поле от тока 1 А для  $j$ -той катушки на радиусе  $r$ . С учетом (4) формула (3) перепишется в виде

$$\sin \phi^*(R_i) - \sin \phi(R_i) = -k \sum_{j=1}^n (I_j^* - I_j) \int_{R_0}^{R_i} g_j(r) S(r) r dr. \quad (5)$$

В формуле (5) функция  $g_j(r)$  предполагается не зависящей от тока в корректирующих катушках, и поэтому для каждой  $j$ -той катушки на произвольном радиусе  $R_i$  можно вычислять коэффициенты

$$G_{ij} = -k \int_{R_0}^{R_i} g_j(r) S(r) r dr. \quad (6)$$

При сделанных выше допущениях связь фазы пролета с магнитным полем в изохронном циклотроне можно выразить системой  $m$  уравнений:

$$\begin{aligned} \Delta \sin \phi(R_1) &= \sum_{j=1}^n G_{1j} \Delta I_j \\ &\dots \\ \Delta \sin \phi(R_m) &= \sum_{j=1}^n G_{mj} \Delta I_j. \end{aligned} \quad (7)$$

Систему уравнений (7) полезно дополнить уравнением, обеспечивающим сохранение величины магнитного поля на радиусе инжекции  $R_0$ . С учетом этого уравнения получаем новую систему уравнений

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

$$\sum_{j=1}^n g_j(R_0) \Delta I_j = H(R_0) - H_{\text{из}}(R_0) = \psi_{m+1} . \quad (8)$$

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  $\epsilon_i$  – разность левой и правой частей уравнения (8),  $a_j$  – экспериментально подбираемые коэффициенты. Дифференцируя (9) по  $\Delta I_j$  и приравнивая производные к нулю, получим систему, в которой число неизвестных равно числу уравнений. Произвольное  $p$ -тое уравнение этой системы имеет вид

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

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  $\Delta I_j$ , 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  $\Delta I_j$ .

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 управляемых обмоток ускорителя (на электронном ускорителе, на котором проводилась коррекция фазы, из-за отсутствия железного ярма постоянная времени контура катушки составляет ≈ 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-

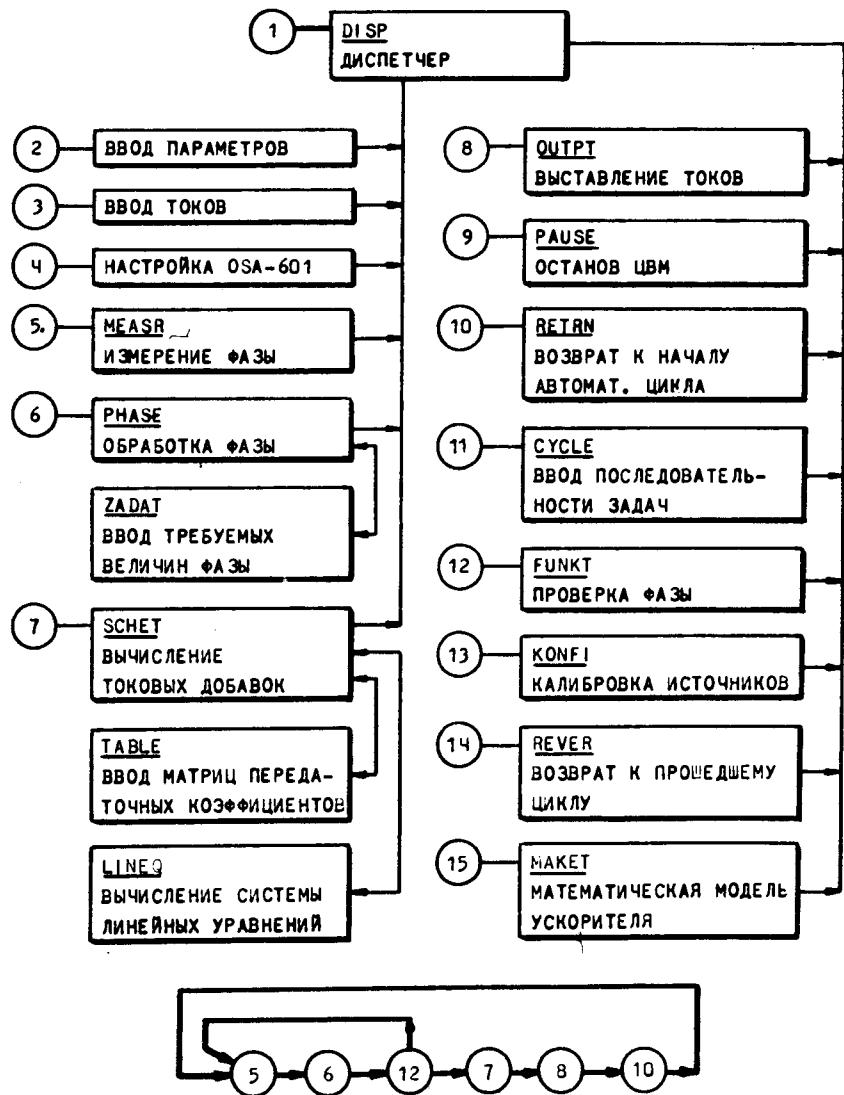


Рис. 2. Блок-схема программы для управления фазой пролета.

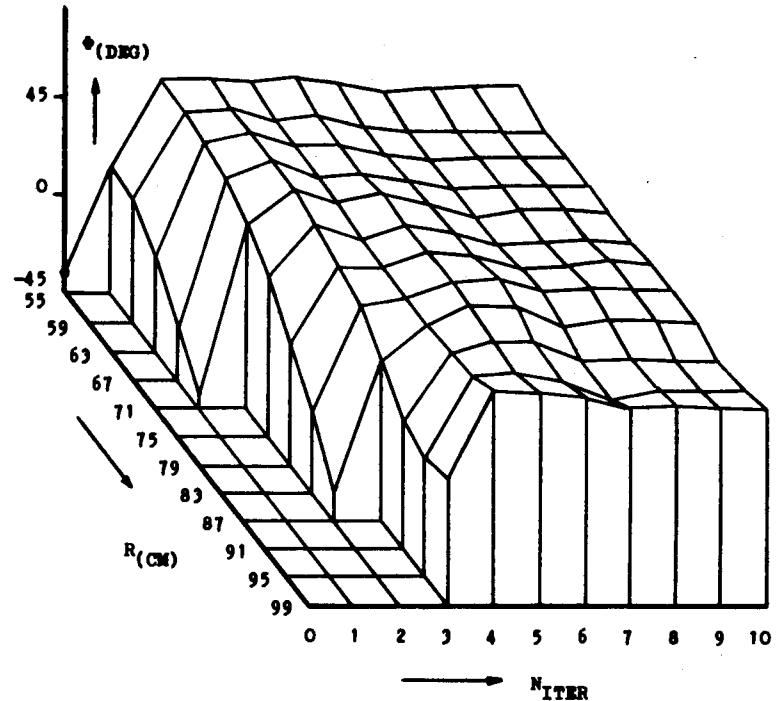


Рис. 3. Диаграмма проводки пучка.

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 фаз пролета), либо произвести коррекцию фазы. Расчет корректирующих токов происходит в подпрограмме SCNET(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 MAKET(15) представляет математическую модель ускорителя с точки зрения описания фазового движения. Применение подпрограммы MAKET 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:

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

показатель ошибки фазы -  $\Phi$ :

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

показатель величины токовых добавок

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

показатель величины тока пучка

$$I_p = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} I_{pi}.$$

Здесь  $\Delta\phi_i$  - отклонение фазы от заданного значения на  $i$ -том радиусе, получаемое с помощью подпрограммы PHASE,  $\Delta I_j$  - корректирующая добавка к току в  $j$ -ой катушке,  $I_{pi}$  - 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  $(-35^\circ)$ , близкой к фазе замедления, которая на рассматриваемом электронном циклотроне составляет  $(-45^\circ)$ . 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.