

P9-2006-40

И. Н. Киян, Р. Тарашкевич*

МЕТОДЫ РАСЧЕТА РЕЖИМОВ РАБОТЫ
И ПАРАМЕТРОВ ИЗОХРОННОГО ЦИКЛОТРОНА

* Институт ядерной физики Польской академии наук, Краков

Киян И. Н., Тарашкевич Р.

P9-2006-40

Методы расчета режимов работы и параметров изохронного циклотрона

В основе метода моделирования режимов работы лежит метод подбора токов в концентрических катушках коррекции многоцелевого изохронного циклотрона для формирования требуемого магнитного поля на определенном уровне тока главной катушки. Традиционный метод подбора токов основан на нахождении решения для всех концентрических катушек коррекции одновременно. Как правило, после установки рассчитанного режима работы необходимо произвести контрольное измерение магнитного поля и повторить расчет для получения требуемого режима работы. Новый метод подбора токов основан на нахождении решения для каждой отдельно взятой концентрической катушки коррекции. Концентрические катушки коррекции берутся по очереди в определенном порядке. Как показал ряд экспериментов по проводке пучков протонов в диапазоне рабочих радиусов ускорения с энергией вывода от 45 до 59 МэВ, который был реализован на многоцелевом изохронном циклотроне АИС144 в ИЯФ ПАН в Кракове, при использовании нового метода для получения требуемого режима работы не нужно производить контрольных измерений магнитных полей, что говорит о высокой точности расчета.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем им. В. П. Дзелепова ОИЯИ и в Институте ядерной физики Польской академии наук в Кракове.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2006

Kiyan I. N., Taraszkiwicz R.

P9-2006-40

Calculation Methods of Isochronous Cyclotron Parameters and Operation Modes

Simulation of operation modes is based on selection of trim coil currents in the multipurpose isochronous cyclotron for formation of the required magnetic field at a certain level of the main coil current. The traditional current selection method is based on finding a solution for all trim coils simultaneously. After setting the calculated operation mode, it is usually necessary to perform a control measurement of the magnetic field and to repeat the calculation of the required operation mode. The new current selection method is based on finding a solution for each particular trim coil. The trim coils are taken one by one in a certain order. A series of experiments on proton beam formation within the range of working radii at extraction energies from 45 to 59 MeV, which were carried out at the AIC144 multipurpose isochronous cyclotron at INP PAS (Krakow), showed that the new method makes unnecessary any control measurements of magnetic fields for getting the desired operation mode, which indicates a high accuracy of the calculation.

The investigation has been performed at the Dzhelepov Laboratory of Nuclear Problems, JINR, and at the Institute of Nuclear Physics of the Polish Academy of Sciences, Krakow.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2006

ВВЕДЕНИЕ

Режим работы многоцелевого изохронного циклотрона, предназначенного для ускорения частиц с различным отношением A/Z , состоит из набора токов в главной катушке и в концентрических катушках коррекции магнитного поля, а также из рассчитываемого значения частоты ВЧ-генератора и напряжения на дуантах. Режим работы моделируется исходя из конкретного задания на ускорение частиц и позволяет сформировать с заданной точностью требуемое магнитное поле в определенном диапазоне рабочих радиусов ускорения от системы инжекции до системы экстракции пучка ионов. К исходным данным относятся: тип ускоряемых частиц, радиус вывода, кинетическая энергия частиц на радиусе вывода, кратность ускорения и периодичность магнитной структуры. Для расчетов используется набор измеренных или смоделированных магнитных полей, сохраняемых в базе данных изохронного циклотрона [5]. В основе метода моделирования режима работы лежит метод подбора токов в концентрических катушках коррекции на рассчитанном уровне тока главной катушки. Традиционный метод подбора токов основан на нахождении решения для всех концентрических катушек коррекции одновременно. Новый метод подбора токов основан на последовательном нахождении решения для каждой отдельно взятой концентрической катушки коррекции.

1. АЛГОРИТМ МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ

На рис. 1 представлена общая блок-схема алгоритма моделирования режимов работы многоцелевого изохронного циклотрона. Пунктиром отмечена та часть алгоритма, которая, как правило, используется вместе с традиционным методом и не используется с новым методом подбора токов в концентрических катушках коррекции на рассчитанном уровне тока главной катушки. Расчет максимального значения фазового движения производится в диапазоне рабочих радиусов ускорения. На рис. 1 использованы следующие обозначения.

1. Ввод исходных данных: тип ускоряемых частиц, радиус вывода, кинетическая энергия на радиусе вывода, кратность ускорения и периодичность магнитной структуры.
2. Расчет частоты обращения частицы в зависимости от кинетической энергии на заданном радиусе вывода.

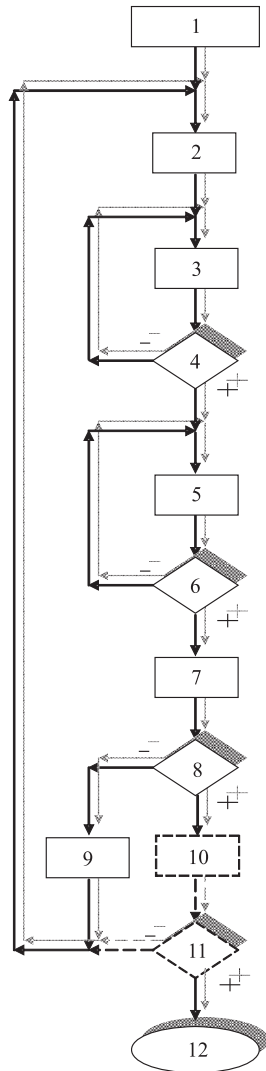


Рис. 1. Блок-схема моделирования режимов работы изохронного циклотрона

циклотроне необходимо произвести контрольные измерения базового и полного магнитных полей и повторить расчет для формирования изохронного

3. Расчет тока главной катушки для изохронного магнитного поля на заданном радиусе.

4. Критерий оценки точности расчета тока главной катушки: $|\Delta I_{mc}| < \varepsilon_I$.

5. При использовании традиционного метода — одновременный расчет набора токов в концентрических катушках коррекции на рассчитанном уровне тока главной катушки. При использовании нового метода — последовательный расчет тока в каждой задействованной концентрической катушке коррекции на рассчитанном уровне тока главной катушки.

6. Критерий оценки максимального значения фазового движения, зависящего от ошибки среднего магнитного поля: $|\Delta\varphi| < \varepsilon_{\Delta\varphi}$.

7. Расчет кинетической энергии на заданном радиусе вывода.

8. Критерий оценки точности расчета кинетической энергии на заданном радиусе вывода: $|\Delta E| < \varepsilon_E$.

9. Коррекция кинетической энергии на заданном радиусе вывода.

10. Установка рассчитанных токов в катушках изохронного циклотрона с последующим измерением магнитного поля.

11. Критерий оценки максимального значения фазового движения, зависящего от ошибки среднего магнитного поля: $|\Delta\varphi| < \varepsilon_{\Delta\varphi}$.

12. Расчет частоты ВЧ-генератора и формирование режима работы изохронного циклотрона.

Как правило, при использовании традиционного метода после установки смоделированного режима работы на

магнитного поля с требуемой точностью. Как показал ряд экспериментов по проводке пучков протонов в диапазоне рабочих радиусов ускорения с энергией вывода от 45 до 59 МэВ, который был реализован на многоцелевом изохронном циклотроне АИС144 в ИЯФ ПАН в Кракове, при использовании нового метода для получения требуемого режима работы не нужно производить контрольные измерения магнитных полей.

2. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ

При использовании как традиционного, так и нового метода подбора токов в concentрических катушках коррекции все расчеты выполняются для рассчитанного уровня тока главной катушки, который определяется исходя из требуемой кинетической энергии частиц на заданном радиусе вывода.

При использовании традиционного метода подбора токов в concentрических катушках коррекции берется разность изохронного магнитного поля и среднего магнитного поля от тока в главной катушке:

$$\Delta \overline{B}_{bs,i} = \overline{B}_{is,i} - \overline{B}_{bs,i}; \quad i = 0 \div n, \quad I_{mc}, \quad (1)$$

где $\overline{B}_{is,i}$ — это изохронное магнитное поле на i -м радиусе; $\overline{B}_{bs,i}$ — это среднее магнитное поле от тока главной катушки на i -м радиусе; I_{mc} — ток главной катушки, а n — это максимальный индекс последнего значения радиуса.

Для компенсации указанной разности с некоторой невязкой берется сумма средних магнитных полей вкладов от всех задействованных concentрических катушек коррекции:

$$\Delta \overline{B}_i = \sum_{j=0}^m \frac{\Delta \overline{B}_{i,j}}{\Delta I_j} \cdot I_j; \quad i = 0 \div n, \quad I_{mc}, \quad (2)$$

где $\Delta \overline{B}_{i,j}$ — это среднее магнитное поле вклада j -й concentрической катушки коррекции на i -м радиусе; I_j — это соответствующий ток j -й катушки. При этом предполагается линейная зависимость вклада concentрической катушки коррекции от ее тока на рассчитанном уровне тока главной катушки.

При использовании точечного метода наименьших квадратов для минимизации суммы квадратов невязок по всем i -м радиусам составляется следующий функционал:

$$S(I_0, I_1, \dots, I_m) = \sum_{i=0}^n (\Delta \overline{B}_i - \Delta \overline{B}_{bs,i})^2; \quad I_{mc}, \quad (3)$$

где I_0, I_1, \dots, I_m — это токи в concentрических катушках коррекции.

Использование метода наименьших квадратов приводит к следующей неоднородной системе линейных алгебраических уравнений:

$$\sum_{j=0}^m \left[\left(\sum_{i=0}^n \left(\frac{\Delta \overline{B}_{i,j}}{\Delta I_j} \cdot \frac{\Delta \overline{B}_{i,k}}{\Delta I_k} \right) \right) \cdot I_j \right] = \sum_{i=0}^n \left[\Delta \overline{B}_{\text{bs},i} \cdot \frac{\Delta \overline{B}_{i,k}}{\Delta I_k} \right];$$

$$k = 0 \div m, \quad I_{\text{мс}}, \quad (4)$$

где i — это индекс радиуса; j — это индекс концентрической катушки коррекции; а k — это индекс алгебраического уравнения в системе.

Решение неоднородной системы линейных алгебраических уравнений может быть найдено с помощью прямого метода Гаусса и представлено в виде

$$I_j; \quad j = 0 \div m, \quad I_{\text{мс}}, \quad (5)$$

где I_j — это токи в концентрических катушках коррекции на рассчитанном уровне тока главной катушки.

При использовании нового метода подбора токов в концентрических катушках коррекции для каждой концентрической катушки коррекции берется разность среднего магнитного поля и изохранного магнитного поля. При этом среднее магнитное поле зависит от набора токов во всех катушках изохранного циклотрона. Указанная разность берется определенное число раз, которое задается требуемым шагом по току в рассматриваемой концентрической катушке коррекции и диапазоном его допустимых значений:

$$\Delta \overline{B}_{\text{mn},i}(I_l) = \overline{B}_{\text{mn},i}(I_l) - \overline{B}_{is,i}; \quad i = 0 \div n, \quad l = 0 \div s, \quad I_{\text{мс}}, \quad (6)$$

где $\overline{B}_{is,i}$ — это изохранное магнитное поле на i -м радиусе; $\overline{B}_{\text{mn},i}(I_l)$ — это среднее магнитное поле на i -м радиусе, зависящее от l -го значения тока в рассматриваемой концентрической катушке коррекции, $I_{\text{мс}}$ — это ток главной катушки, а s — это максимальный индекс наибольшего значения тока в рассматриваемой концентрической катушке коррекции.

Далее составляется дискретная функция усредненного по радиусу квадрата отклонения среднего магнитного поля от изохранного магнитного поля в зависимости от значения тока в рассматриваемой концентрической катушке коррекции на рассчитанном уровне тока главной катушки:

$$F_l(I_l) = \frac{\sum_{i=0}^n (\Delta \overline{B}_{\text{mn},i}(I_l))^2}{n+1}; \quad l = 0 \div s, \quad I_{\text{мс}}, \quad (7)$$

где i — это индекс значения радиуса, а l — это индекс значения тока в рассматриваемой концентрической катушке коррекции.

С помощью метода кубических сплайнов производится необходимая интерполяция значений полученной дискретной функции. После чего с помощью метода Ньютона с заданной точностью находится оптимальное значение тока в рассматриваемой концентрической катушке коррекции на рассчитанном уровне тока главной катушки:

$$I_{\text{opt}}; I_{\text{mc}}. \quad (8)$$

Расчет изохронного магнитного поля производится согласно процедуре, представленной в [1]. Последовательный расчет оптимальных токов в каждой рассматриваемой концентрической катушке коррекции должен производиться в направлении от края к центру многоцелевого изохронного циклотрона.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

16 декабря 2004 г. и 20 июня 2005 г. на многоцелевом изохронном циклотроне АИС144 в ИЯФ ПАН в Кракове были осуществлены эксперименты по проводке пучков протонов в диапазоне рабочих радиусов ускорения на средние и высокие энергии вывода соответственно (см. таблицу). Далее представлены результаты сделанных расчетов.

Каждому рассчитанному режиму работы соответствует своя интерполированная карта магнитного поля. Для примера далее показан анализ интерполированной карты магнитного поля для режима работы от 20.06.05 г.

На рис. 2 и 3 представлены соответственно среднее магнитное поле и ошибка среднего магнитного поля указанного режима работы [2], где I — это кривая изохронного магнитного поля, рассчитанного без учета флаттера;

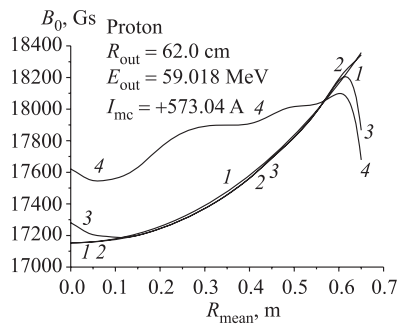


Рис. 2. Среднее магнитное поле

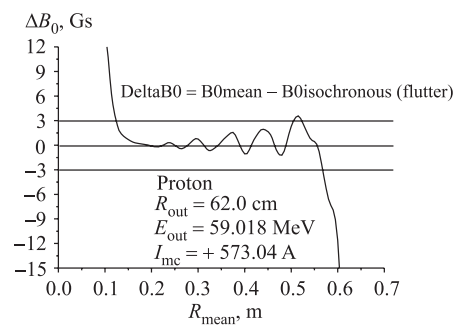


Рис. 3. Ошибка среднего магнитного поля

Тема	Режим	Режим	Режим
15.12.05	16.12.04/I	16.12.04/II	20.06.05
Тип частиц	Протоны	Протоны	Протоны
Радиус вывода, см	61,5	62	62
Энергия вывода, МэВ	45,459	46,239	59,018
Частота ВЧ-генератора, МГц	23,31	23,31	26,15
Напряжение на дуантах, кВ	50	50	65
Ток главной катушки (расчетный), А	276,640	277,940	573,04
Ток главной катушки, А	276,250	277,840	573,88
Ток катушки коррекции N01, А	+141,2	+211,0	+2,8
Ток катушки коррекции N02, А	-51,9	-78,3	0,0
Ток катушки коррекции N03, А	+34,7	+40,2	+95,0
Ток катушки коррекции N04, А	-54,3	-57,4	-5,6
Ток катушки коррекции N05, А	+166,2	+171,1	+93,6
Ток катушки коррекции N06, А	-46,0	-51,2	+82,0
Ток катушки коррекции N07, А	+157,0	+161,2	+75,5
Ток катушки коррекции N08, А	+38,2	+36,2	-3,5
Ток катушки коррекции N09, А	+35,7	+37,2	-98,9
Ток катушки коррекции N10, А	-21,4	-23,3	-149,2
Ток катушки коррекции N11, А	-8,1	-7,5	-213,9
Ток катушки коррекции N12, А	+21,0	+18,8	-232,6
Ток катушки коррекции N13, А	+39,6	+36,4	-138,9
Ток катушки коррекции N14, А	+162,6	+166,8	-101,0
Ток катушки коррекции N15, А	-52,7	-59,0	-338,7
Ток катушки коррекции N16, А	+61,8	+59,0	-389,8
Ток катушки коррекции N17, А	+47,4	+38,1	-54,1
Ток катушки коррекции N18, А	+10,8	+27,7	-192,9
Ток катушки коррекции N19, А	+97,8	+55,4	-165,0
Ток катушки коррекции N20, А	+184,7	+170,2	-55,0
Ток катушки коррекции N21, А	0,0	0,0	0,0

2 — это кривая изохронного магнитного поля, рассчитанного с учетом флаттера; 3 — это кривая среднего магнитного поля и 4 — это кривая среднего магнитного поля от тока в главной катушке.

На рис. 4 и 5 представлены функция флаттера и частоты свободных колебаний указанного режима работы соответственно [3, 6].

На рис. 6 и 7 представлены месторасположение резонанса Уолкиншоу и расчетная кинетическая энергия указанного режима работы соответственно [4].

На рис. 8 и 9 представлены расчетное фазовое движение и экспериментальное значение тока полученного пучка протонов указанного режима работы соответственно.

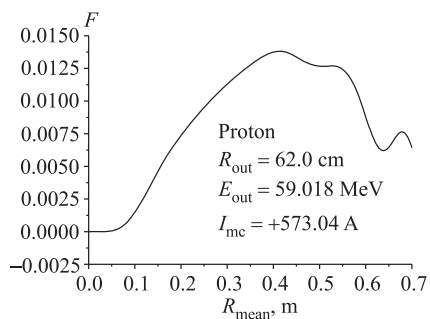


Рис. 4. Функция флаттера

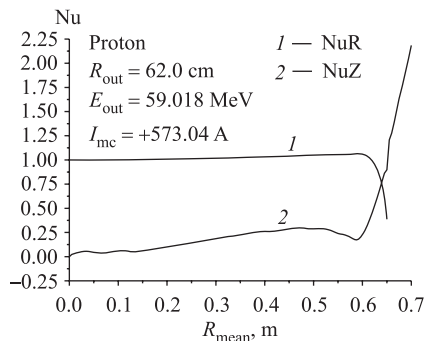


Рис. 5. Частоты свободных колебаний

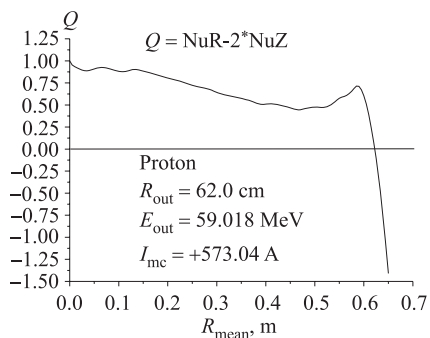


Рис. 6. Месторасположение резонанса Уолкиншоу

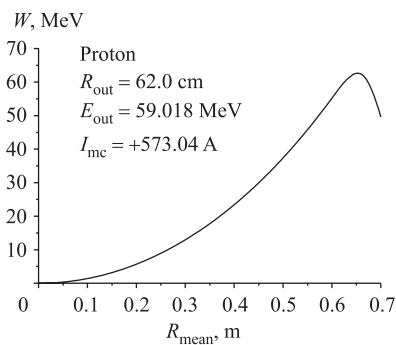


Рис. 7. Расчетная кинетическая энергия

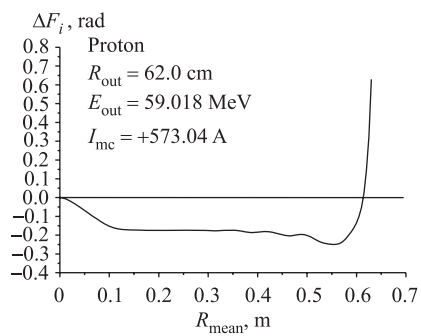


Рис. 8. Фазовое движение

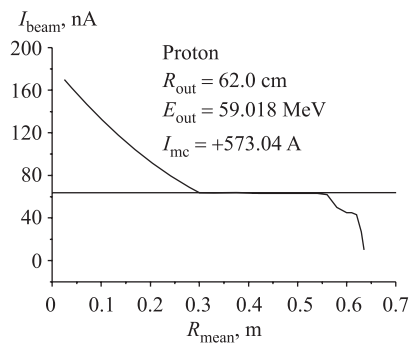


Рис. 9. Ток пучка протонов

При расчетах использовалась программа моделирования режимов работы, основанная на новом методе подбора токов в концентрических катушках коррекции на рассчитанном уровне тока главной катушки [7].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как показал ряд экспериментов по проводке пучков протонов в диапазоне рабочих радиусов ускорения с кинетической энергией частиц на радиусе вывода от 45 до 59 МэВ, который был реализован на многоцелевом изохронном циклотроне АІС144 в ИЯФ ПАН в Кракове, при использовании нового метода моделирования режимов работы для получения требуемого результата не нужно производить контрольных измерений магнитных полей. При использовании нового метода, по сравнению с традиционным, время проводки пучка ионов до конечного радиуса ускорения после установки смоделированного режима работы на изохронном циклотроне значительно сокращается и составляет порядка 10 мин, так как пучок ионов ускоряется без эмпирической подстройки токов в концентрических катушках коррекции, а также без эмпирической подстройки частоты ВЧ-генератора. При этом значение тока в главной катушке практически не отличается от расчетного, а его незначительная регулировка связана лишь с температурным изменением магнитной проницаемости железа главного магнита. Кроме того, потери тока пучка ионов в диапазоне рабочих радиусов ускорения значительно сокращаются за счет более качественного приближения среднего магнитного поля к изохронному. Все вышесказанное говорит о высокой точности расчетов, производимых с использованием нового метода, что приводит к существенной экономии рабочего времени. Это особенно важно при работе на многоцелевой машине, когда требуется перейти на новый, еще не рассчитанный режим работы в течение 2–4 ч от момента постановки задачи до момента получения пучка ионов на конечном радиусе ускорения.

К преимуществам нового метода, по сравнению с традиционным, можно отнести более простое математическое обоснование, что, как известно, соответствует основной задаче математики по упрощению существующего решения рассматриваемой задачи. В то же время технология практической реализации нового метода, по сравнению с технологией практической реализации традиционного метода, является значительно более сложной.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Gordon M. M.* Calculation of Isochronous Fields for Sector-Focused Cyclotrons // Part. Accelerators. 1983. V. 13. P. 67–84.

2. *Киян И. Н., Ворожцов С. Б., Тарашкевич Р.* Описание программы расчета среднего магнитного поля изохронного циклотрона с учетом флаттера. Сообщение ОИЯИ Р9-2002-170. Дубна, 2002.
3. *Киян И. Н., Ворожцов С. Б., Тарашкевич Р.* Описание программы расчета частот бетатронных колебаний. Сообщение ОИЯИ Р9-2002-171. Дубна, 2002.
4. *Киян И. Н., Ворожцов С. Б., Тарашкевич Р.* Описание программы расчета замкнутых равновесных орбит изохронного циклотрона. Сообщение ОИЯИ Р9-2003-109. Дубна, 2003.
5. *Киян И. Н., Ворожцов С. Б., Тарашкевич Р.* Описание базы данных изохронного циклотрона. Сообщение ОИЯИ Р9-2004-123. Дубна, 2004.
6. *Киян И. Н., Тарашкевич Р.* Анализ области применения аналитических формул для расчета частот свободных колебаний в изохронных циклотронах. Сообщение ОИЯИ Р9-2005-114. Дубна, 2005.
7. *Киян И. Н.* Новый метод моделирования режима работы многоцелевого изохронного циклотрона // 6-й Междунар. семинар памяти В. П. Саранцева. Сб. аннот. Д9-2005-123. Дубна, 2005.

Получено 29 марта 2006 г.

Редактор *Е. В. Сабеева*

Подписано в печать 14.06.2006.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 0,56. Уч.-изд. л. 0,69. Тираж 270 экз. Заказ № 55369.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@pds.jinr.ru

www.jinr.ru/publish/