

УДК 51-7:621.384.633.5

НОВЫЙ МЕТОД МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ МНОГОЦЕЛЕВОГО ИЗОХРОННОГО ЦИКЛОТРОНА

И. Н. Киян

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

В основе метода моделирования режима 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 60 МэВ, который был реализован на многоцелевом изохронном циклотроне АИС144 в ИЯФ ПАН¹ в Кракове, при использовании нового метода для получения требуемого режима работы не нужно производить контрольных измерений магнитных полей, что говорит о высокой точности расчета.

The method of modelling the working mode is based on the method of selecting the trim coil currents in the multipurpose isochronous cyclotron for formation of the desired magnetic field on a certain level of the main coil current. The traditional method of selecting the currents is based on finding a solution for all trim coils simultaneously. Usually, after the setting of the calculated working mode it is required to make control measurement of the magnetic field and repeat the calculation of the desired working mode. The new method of selecting the currents is based on finding a solution for each separately taken trim coil. The trim coils are taken by turn in a certain order. As shown by a series of experiments aimed at producing proton beams within the working radii range with the output energy from 45 to 60 MeV, which was realized on АИС144 at the INP PAS², with the new method it is not required to make control measurements of the magnetic fields for obtaining the desired working mode, which testifies to high accuracy of the calculation.

ВВЕДЕНИЕ

Режим работы многоцелевого изохронного циклотрона, предназначенного для ускорения частиц с различным отношением A/Z , включает в себя набор токов в главной катушке и в концентрических катушках коррекции магнитного поля, а также 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

¹ИЯФ ПАН — Институт ядерной физики Польской академии наук.

²The Institute of Nuclear Physics of the Polish Academy of Sciences.

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. В основе метода моделирования режимов 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 нахождении решения для каждой отдельно взятой концентрической катушки коррекции [2].

1. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ

При использовании как традиционного, так и нового метода подбора токов в концентрических катушках коррекции все расчеты выполняются для определенного уровня тока главной катушки, который рассчитывается исходя из требований, предъявляемых к кинетической энергии частиц на заданном радиусе вывода.

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

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

где $\overline{B}_{is,i}$ — изохронное магнитное поле на i -м радиусе; $\overline{B}_{bs,i}$ — среднее магнитное поле от тока главной катушки на i -м радиусе; I_{mc} — ток главной катушки.

Для компенсации указанной разности с некоторым несоответствием берется сумма средних магнитных полей вкладов от всех задействованных концентрических катушек коррекции:

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

где $\Delta \overline{B}_{i,j}$ — среднее магнитное поле вклада j -й концентрической катушки коррекции на i -м радиусе; I_j — соответствующий ток j -й катушки. При этом предполагается прямо пропорциональная зависимость вклада концентрической 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 — токи в концентрических катушках коррекции.

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

$$\sum_{j=0}^m \left[\left(\sum_{i=0}^n \left(\frac{\Delta \overline{B}_{i,j}}{\Delta I_j} \frac{\Delta \overline{B}_{i,k}}{\Delta I_k} \right) \right) I_j \right] = \sum_{i=0}^n \left[\Delta \overline{B}_{bs,i} \frac{\Delta \overline{B}_{i,k}}{\Delta I_k} \right] \quad (k = 0 \div m; I_{mc}), \quad (4)$$

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

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

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

где I_j — 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 значений среднего магнитного поля и изохронного магнитного поля. При этом среднее магнитное поле зависит от набора токов во всех катушках изохронного циклотрона. Указанная разность берется определенное число раз, которое задается требуемым шагом по току в рассматриваемой концентрической катушке коррекции и диапазоном его допустимых значений:

$$\Delta \overline{B}_{mn,i}(I_l) = \overline{B}_{mn,i}(I_l) - \overline{B}_{is,i} \quad (i = 0 \div n; l = 0 \div s; I_{mc}), \quad (5)$$

где $\overline{B}_{is,i}$ — изохронное магнитное поле на i -м радиусе; $\overline{B}_{mn,i}(I_l)$ — среднее магнитное поле на i -м радиусе, зависящее от l -го значения тока в рассматриваемой концентрической катушке коррекции; I_{mc} — ток главной катушки.

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

$$F_l(I_l) = \frac{\sum_{i=0}^n (\Delta \overline{B}_{mn,i}(I_l))^2}{n+1} \quad (l = 0 \div s; I_{mc}), \quad (6)$$

где i — индекс радиуса, а l — 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:

$$I_{opt} \quad (I_{mc}). \quad (7)$$

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.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

В таблице представлены смоделированные режимы работы, использованные в экспериментах на многоцелевом изохронном циклотроне АІС144¹ в ИЯФ ПАН в Кракове. При расчетах применялась программа моделирования режимов работы, основанная на новом методе подбора токов в концентрических катушках коррекции на рассчитанном уровне тока главной катушки.

Режимы работы

Параметры режима работы	Режим 16.12.04/І	Режим 16.12.04/ІІ	Режим 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, А			
№01	+141,2	+211,0	+2,8
№02	-51,9	-78,3	0,0
№03	+34,7	+40,2	+95,0
№04	-54,3	-57,4	-5,6
№05	+166,2	+171,1	+93,6
№06	-46,0	-51,2	+82,0
№07	+157,0	+161,2	+75,5
№08	+38,2	+36,2	-3,5
№09	+35,7	+37,2	-98,9
№10	-21,4	-23,3	-149,2
№11	-8,1	-7,5	-213,9
№12	+21,0	+18,8	-232,6
№13	+39,6	+36,4	-138,9
№14	+162,6	+166,8	-101,0
№15	-52,7	-59,0	-338,7
№16	+61,8	+59,0	-389,8
№17	+47,4	+38,1	-54,1
№18	+10,8	+27,7	-192,9
№19	+97,8	+55,4	-165,0
№20	+184,7	+170,2	-55,0
№21	0,0	0,0	0,0

В качестве примера представлены результаты одного из экспериментов, проведенного 16 декабря 2004 г. (ІІ). В результате успешно проведенного эксперимента был получен

¹Многоцелевой изохронный циклотрон в Институте ядерной физики Польской академии наук. Основное назначение: лечение меланомы глаза пучком протонов с энергией в камере облучения порядка 60 МэВ и током порядка 10 нА.

пучок протонов в диапазоне рабочих радиусов ускорения на расчетную кинетическую энергию частиц порядка 46,239 МэВ на радиусе вывода.

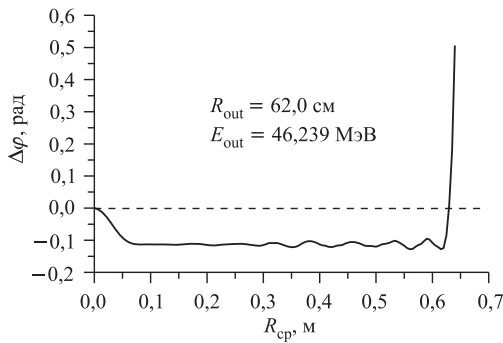


Рис. 1. Фазовое движение

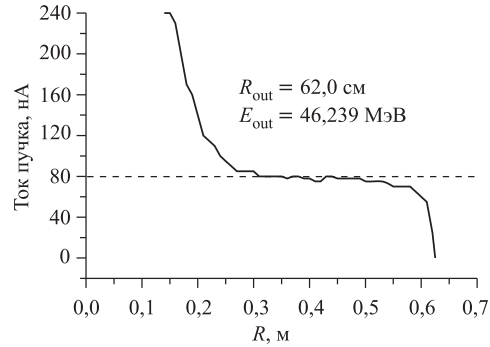


Рис. 2. Ток полученного пучка протонов

На рис. 1 и рис. 2 представлены фазовое движение и значение тока полученного пучка протонов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как показал ряд экспериментов по проводке пучков протонов в диапазоне рабочих радиусов ускорения с кинетической энергией частиц от 45 до 60 МэВ на радиусе вывода, которые были реализованы на многоцелевом изохронном циклотроне АИС144 в ИЯФ ПАН в Кракове, при использовании нового метода подбора токов в концентрических катушках коррекции на рассчитанном уровне тока главной катушки для получения требуемого режима работы не нужно производить контрольных измерений магнитных полей. Новый метод позволяет сократить время проводки пучка ионов в диапазоне рабочих радиусов ускорения после установки смоделированного режима работы на циклотроне до 10 мин, так как пучок ионов получается 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 величины 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 с использованием нового метода подбора токов в концентрических катушках коррекции на рассчитанном уровне тока главной катушки, 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 в диапазоне рабочих радиусов ускорения.

К преимуществам нового метода по сравнению с традиционным можно отнести также более простое математическое обоснование, что, как известно, соответствует основной

задаче математики: 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 из-за необходимости обработки больших массивов данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Gordon M. M.* Calculation of Isochronous Fields for Sector-Focused Cyclotrons // Part. Accelerators. 1983. V. 13. P. 67–84.
2. *Киян И.Н.* Новый метод моделирования режима работы многоцелевого изохронного циклотрона // 6-й Междунар. семинар памяти профессора В. П. Саранцева: Сб. аннот. Дубна, 2005.