

МОЩНЫЙ АСИНХРОННЫЙ ЦИКЛОТРОН МНОГОЦЕЛЕВОГО НАЗНАЧЕНИЯ

А.Р. ТУМАНЯН, Х.А. СИМОНЯН, В.Ц. НИКОГОСЯН

Ереванский физический институт

А.Г. ХУДАВЕРДЯН

Ереванский государственный университет

(Поступила в редакцию 16 сентября 1996 г.)

Описаны концепция и схемное решение мощного "асинхронного" протонного многоступенчатого циклотрона, который обеспечивает, по сравнению с традиционным, ряд преимуществ и может быть применен одновременно для разных целей, в частности, как мощный протонный драйвер для управляемых ускорителем трансмутационных технологий, в качестве источника для протонной терапии, для производства различных изотопов и т.д. Рассмотрена возможность размещения четырехступенчатого циклотрона такого типа с энергией до 1,0 ГэВ и токами до 30 мА в сооружениях Ереванского электронного синхротрона на энергию 6 ГэВ.

Введение

Для успешного решения проблем электроядерных технологий необходимы мощные ускорители протонов с токами пучков в диапазоне 10-50 мА, при энергиях 1,0-1,5 ГэВ и с высоким значением КПД. Для производства различных изотопов нужны пучки протонов с энергиями 20-40 МэВ и с токами до нескольких мА, а для протонной терапии необходимы пучки с прецизионной (порядка 1%) регулировкой энергии в диапазоне 70-235 МэВ [1]. Такие параметры можно одновременно обеспечить в предлагаемой схеме многоступенчатого циклотрона, условно названного Коаксиально-Кольцевым Циклотроном (ККЦ) [1,2].

В настоящей работе рассматривается возможность создания комплекса "асинхронных" (или "неизохронных", см. ниже) циклотронов, на конечную энергию 1,0 ГэВ и с токами пучка до 30 мА, в сооружениях Ереванского электронного синхротрона на 6 ГэВ.

Концепция ККЦ

Принцип работы ККЦ заключается в следующем. Пучки инжектируются на орбиты больших радиусов, имеющие малые значения напряженности ведущих магнитных полей (меньше 0,4-0,5 Т), а ступени циклотронов вставляются коаксиально или концентрически одна в другую. Такая концепция построения многоступенчатого комплекса циклотронов приводит, по сравнению с традиционными, к следующим преимуществам.

1. Коаксиальное расположение ступеней циклотронов приводит к упрощению техники инжектирования и уменьшению потерь пучка при транспортировке.

2. Обеспечивается широкая сепарация орбит, т.е. большой шаг смещения орбиты по радиусу за один оборот $\Delta R_{об}$, что, в свою очередь, приводит к возможности одновременного инжектирования и ускорения нескольких независимых пучков и, тем самым, к увеличению суммарного тока ускоряемого пучка. Это можно осуществить в случае применения традиционных схем циклотронов с различными типами азимутальной вариации магнитных полей. В случае же применения схем Циклотронов с Разделенными Орбитами (ЦРО) увеличение интенсивности целесообразно осуществлять установкой идентичных циклотронов одного над другим с использованием общих ускоряющих резонаторов [3].

3. Выбор большого радиуса циклотрона приводит к возможности установки большого количества магнитных элементов и ускоряющих резонаторов. Первое, в свою очередь, приводит к возможности усиления фокусировки пучка, а второе – к дополнительному увеличению сепарации орбит и к увеличению прироста энергии на обороте $\Delta E_{об}$. Последнее приводит к уменьшению числа оборотов (n) пучка.

4. Уменьшение n , в свою очередь, приводит как к уменьшению ограничения интенсивности пучка от продольных эффектов пространственного заряда, которые пропорциональны n^{-3} , так и к ослаблению допусков на магнитную систему.

5. Существенное увеличение значения $\Delta R_{об}$ приводит к значительному облегчению решения проблемы 100%-ного вывода пучков.

6. Выбор больших диаметров циклотронов и высоких значений частот ускоряющих напряжений позволяет создавать "асинхронные", или "неизохронные", режимы работы циклотронов, т.е со значительным изменением частоты обращения частиц в одной ступени с помощью изменения номера гармоники (кратности) вч напряжения путем перестройки магнитной дорожки. Преимущество такого режима заключается в том, что появляется возможность ограничить рост расстояния по радиусу между начальной и конечной орбитами с возможностью неограничиваемого увеличения среднего радиуса установки и, главное, соответствующего неограничиваемого уменьшения напряженности магнитных полей. Последнее существенно облегчает задачу создания малогабаритных магнитных элементов без использования сверхпроводимости, что немаловажно для промышленных ускорителей. Примеры таких режимов приведены ниже.

Однако создание таких режимов возможно только в случаях обеспечения условия

$$q = \frac{h}{N_p} = \frac{f_{\text{rf}}}{N_p f_0} = \frac{f_{\text{rf}} 2\pi R}{N_p v} \gg 10, \quad (1)$$

где q – относительный номер гармоники, h – номер гармоники, N_p – количество резонаторов в ступени циклотрона, f_0 – частота обращения частиц, f_{rf} – частота ускоряющего поля, R – средний радиус орбиты, v – скорость частиц.

ККЦ ЕрФИ

В качестве демонстрационного примера рассмотрен вариант размещения четырехступенчатого асинхронного ККЦ на энергию до 1,0 ГэВ и с токами 1-30 мА в существующем кольце и прилегающих сооружениях электронного синхротрона на энергию 6 ГэВ Ереванского физического института (ЕрФИ). Размеры радиационных сооружений приведены в работах [1,2].

Результаты расчетов суммированы в Таблице 1. Для расчетов использовалась созданная в ЕрФИ математическая модель и компьютерная программа РАМАД.

Все четыре ступени циклотронов проектируются по схеме ЦРО, так как результаты анализа показывают [4], что только такая схема в принципе способна надежно обеспечить ускорение больших токов (10 мА и более) при малых потерях. Первые две ступени ККЦ ЕрФИ проектируются в виде асинхронных циклотронов с постоянным значением шага сепарации орбит, равной 13 см, вследствие чего номера их гармоник h меняются в значительных пределах (см. Таблицу 1), а средние величины магнитных полей приобретают такие малые значения, что вопрос изготовления малогабаритных магнитных элементов представляется не проблематичным. При этом значение частоты ускоряющего поля принято равным 129 МГц (т.е. равным ускоряющей частоте существующего синхротрона) с целью максимального использования оборудования (вч генераторов, фидерных линий, и др.) синхротрона и соответствующего снижения стоимости конверсии электронного ускорителя в протонный. Относительно малые значения прироста энергии на обороте в первых двух ступенях, приведенные в Таблице 1, обусловлены величиной транзит-фактора частиц при выбранном значении ускоряющей частоты.

Необходимо отметить, что при настройке магнитной системы асинхронного циклотрона в моменты "перескока" с одной гармоники на другую будет теряться некоторое количество банчей пучка. Поэтому наладку магнитной системы необходимо осуществлять при уменьшенных значениях тока пучка протонов. Однако выбранное значение частоты ускоряющего напряжения является недостаточно высоким для создания асинхронных режимов работы в последних двух ступенях ККЦ ЕрФИ при существующих диаметрах радиационных помещений. Поэтому эти ступени будут работать при постоянном значении номера гармоники и с изменяющимся значением шага сепарации орбит (см. Таблицу 1).

Протонные пучки с энергией 1,0 ГэВ из четвертой оконечной ступени выводятся в существующий большой экспериментальный зал для управления моделями различных подкритических реакторов, а пучки с энергиями 20-40 МэВ и прецизионно варьируемые в диапазоне 70-235 МэВ выводятся вертикально и транспортируются в специально разрабатываемые изотопный и терапевтический корпуса.

В качестве ускоряющих резонаторов предполагается использовать

современные конструкции, аналогичные разработанным и смоделированным в [4-6] и развивающие напряжение до 1,1 МВ.

Таблица 1.

Параметры	Ступени			
	1	2	3	4
$E_{и}$ [MeV]	10	70	300	600
$E_{э}$ [MeV]	70	300	600	1000
$R_{и}$ [m]	6,0	13,0	19,3	32,6
$R_{э}$ [m]	10,1	17,2	23,4	36,2
$H_{и}$ [T]	0,076	0,11	0,14	0,12
$H_{э}$ [T]	0,12	0,14	0,17	0,16
N	8	16	32	56
N_m	8	16	32	56
N_p	4	8	16	28
N_c	12	24	48	84
$\Delta E_{об}$ [MeV]	2,0	8,0	17,6	30,8
$\Delta R_{об,и}$ [cm]	13,0	15,0	36,0	36,0
$\Delta R_{об,э}$ [cm]	13,0	15,0	16,9	16,1
n	30	28	17	13
h	112 - 76	96 - 72	80	112

Здесь N , N_m , N_p , N_c – количество секторов, магнитных блоков, резонаторов и свободных промежутков, соответственно, H – напряженность среднего поля на орбите, индекс (и) означает "инжекция", (э) – "эжекция", (об) – "оборот", остальные обозначения приведены в тексте статьи.

При реализации программы работ на начальном этапе предполагается осуществить ускорение протонов с током в диапазоне 1-10 мА для управления демонстрационным реактором мощностью до 10 МВт. В дальнейшем, по мере необходимости, ток протонов можно увеличить до 30 мА путем наращивания по вертикали идентичных циклотронов с использованием общих резонаторов.

В данной работе не затронут большой и важный объем вопросов, касающихся подробных численных расчетов конкретных вариантов, моделирования основных систем и узлов, оптимизации параметров ККЦ на основе детальных исследований динамики пучков и т.д. Основная цель данного сообщения – показать, что на пути создания асинхронного ККЦ ЕрФИ отсутствуют принципиальные запреты.

В заключение авторы выражают благодарность ряду ведущих сотрудников ЕрФИ и некоторых институтов России и США за обсуждения и полезные замечания.

ЛИТЕРАТУРА

1. А.Р.Туманян и др. "Циклотрон для атомной энергетики", Атомная техника за рубежом, №8 (1996).
2. A.R.Tumanian, Kh.A.Simonian and Z.G.Guiragossian. "Powerful cyclotron for accelerator driven transmutation technologies", presented at the International Conference on Accelerator Driven Transmutation Technologies and Applications, Kalmar, Sweden, June 1996.
3. I.A.Shelaev, "Superconducting separated orbit cyclotron for electronuclear reactor", JINR Rapid Communications, no. 5[62]-93.
4. U.Trinks, "Exotic cyclotrons – future cyclotrons", CERN Accelerator School Cyclotrons, May 1994, CERN 96-02, 1996.
5. Proceedings of Workshop on Critical Beam Intensity Issues in Cyclotrons, Santa Fe, NM, December 4-6, 1995.
6. N.Fietier, P.Mandrillon. "A three-stage cyclotron for driving the energy amplifier", CERN/AT/95-03(ET), Geneva, 1995.

ԲԱԶՄԱՆՊԱՏԱԿԱՅԻՆ ՀԶՈՐ ԱՍԻՆԽՐՈՆԱՅԻՆ ՑԻԿԼՈՏՐՈՆ

Ա.Ր.ԹՈՒՄԱՆՅԱՆ, Խ.Ա.ՍԻՄՈՆՅԱՆ, Վ.Ց.ՆԻԿՈՂՈՍՅԱՆ, Ա.Հ.ԽՈՒՂԱՎԵՐԴՅԱՆ

Աշխատանքում տրված են հզոր պրոտոնային բազմաստիճան ասինխրոն ցիկլոտրոնի հիմնադրույթները: Առաջարկվող ցիկլոտրոնը սովորական ցիկլոտրոնների նկատմամբ ունի մի շարք առավելություններ: Ուսումնասիրված է Երևանի 6 ԳԵՎ էներգիայով էլեկտրոնային սինքրոտրոնի օղակաձև կառույցներում 1.0 ԳԵՎ էներգիա և 30 մԱ հոսանք ունեցող ջերմաստիճանային ցիկլոտրոնի տեղավորման հնարավորությունը:

A POWERFUL ASYNCHRONOUS CYCLOTRON FOR MULTIPURPOSE APPLICATIONS

A.R. TUMANIAN, KH.A. SIMONIAN, V.TS. NIKOGHOSIAN, A.G. KHUDAVERDIAN

The concept and general layout of a new high-power proton multistage "asynchronous" cyclotron is presented. The proposed cyclotron system has a number of advantages over the conventional one and may be simultaneously used for different purposes, particularly it can serve as a powerful proton driver in several applications of the Accelerator Driven Transmutation Technologies and also serve as a proton cancer therapy source, an isotopes processing source, etc. The possibility of fitting a four-stages cyclotron which is able to produce 1.0 GeV, 30 mA average-current protons, into the plant facilities of the existing 6-GeV Yerevan Electron Synchrotron is described.