

Разветвлённые резонаторы для циклотронов

Ю.В. Смирнов

НИИЭФА им. Д.В.Ефремова, Санкт-Петербург, Россия

В работе систематизированы резонаторы с разветвлённой формой проводников для циклотронов и выделены в самостоятельный класс – разветвлённые резонаторы для циклотронов (РРЦ). Разветвлённые резонаторы (РР) сравниваются с четвертьволновыми и полуволновыми неразветвлёнными резонаторами (НР), выполненными из отрезков передающих линий с суммарной относительной длиной $S = \pi/2$ и $S = \pi$ радиан соответственно. Отрезки состоят из внешнего и внутреннего проводников с зазором между ними. В сечении проводники могут иметь цилиндрическую, прямоугольную, секторную и др. формы. В отрезках передающих линий возбуждаются электромагнитные поля типа ТЕМ.

РР отличаются от НР по следующим критериям: А) по конструктивному признаку (РР представляет из себя НР с подключённым дополнительным конструктивным элементом, например отрезком, нагруженным на ёмкость, и др.); Б) по эквивалентной схеме (схемы РРЦ содержат дополнительный конструктивный элемент); В) по распределению электромагнитных полей и, соответственно, токов и напряжений.

РРЦ классифицированы на два вида: с параллельно и последовательно подключённым дополнительным конструктивным элементом. Эпюры тока и напряжения РРЦ первого вида содержат разветвления в месте подключения дополнительного элемента. Кроме того, в этом месте изменяется скачком амплитуда тока. В эпюрах РРЦ второго вида в месте подключения дополнительного элемента скачком изменяется амплитуда напряжения.

Требования к НР и РР идентичны: резонаторы возбуждаются на фиксированной частоте или в диапазоне частот; должны обладать наименьшими скин-потерями в стенках; в них должно быть возбуждено ускоряющее напряжение с требуемым распределением; резонаторы должны быть компактны, просты и надёжны в эксплуатации; и др.

Конструкции РРЦ в ряде случаев оптимальны для выполнения поставленных требований.

1-й тип. РРЦ с параллельно подключёнными разомкнутыми отрезками (рис.1).

РР отличается от НР малыми продольными размерами из-за развитой ёмкостной части и, соответственно, бо́льшей эквивалентной ёмкости. Внутренний проводник 1 резонатора выполнен Y-образной формы с подключёнными дуантами 2, угловая протяжённость которых равна $45-60^\circ$. Внешний проводник формируется плакировкой камеры 3 и баком 4.

На рис.1 представлен РР для циклотрона ДЦ с магнитопроводом броневого типа [1], предназначенного для ускорения дейтронов до энергии 3 МэВ. Резонатор работает на 2-й гармонике частоты обращения ионов – 21,4 МГц. Амплитуда ускоряющего напряжения 15 кВ. Угловая протяжённость дуантов -60° . У резонатора $S = \pi/2$ радиан. По сравнению с НР циклотрона на эту же энергию дейтронов рассматриваемый РРЦ компактнее при практически одинаковых скин-потерях в стенках. Для перестройки частоты РРЦ рассматриваемого типа снабжаются перемещаемыми закорачивающим устройством или панелями, которые располагаются в баке 4. Например, в РРЦ для циклотрона БКЦ-20 перестройка частоты в диапазоне 22...44 МГц производится перемещением трёхзвенных панелей [1].

2-ой тип. РРЦ с параллельно подключёнными короткозамкнутыми отрезками (рис. 2).

РРЦ имеет развитую индуктивную часть и, следовательно, меньшую эквивалентную индуктивность и бо́льшие габариты, чем НР. Резонатор без подключённого короткозамкнутого отрезка возбуждается на более низкой частоте. Особенность резонатора – возможность сформировать нарастающее по радиусу ускоряющее напряжение с максимальной амплитудой в районе максимального радиуса r движения заряженных частиц, что благоприятствует разделению орбит в зоне вывода пучков частиц из циклотрона. РР предназначены для работы на фиксированной частоте и в диапазоне частот.

На рис. 2а для примера представлен РРЦ для кольцевого циклотрона ЦРС-10 [2] с угловой протяжённостью дуанта 30° , диапазоном перестраиваемых частот 12-24 МГц, который осуществляется перемещением плунжеров 4 и панелей 5. Короткозамкнутые отрезки могут располагаться перпендикулярно и с наклоном к дуанту. Максимальная амплитуда ускоряющего напряжения 250 кВ. При подключении короткозамкнутых отрезков 3 к дуанту 1 и к охватывающему дуанту проводнику 2 в районе малых радиусов в РРЦ формируется нарастающее по радиусу ускоряющее напряжение, а в районе максимальных радиусов – спадающее по радиусу ускоряющее напряжение. У рассматриваемого типа РРЦ $S=\pi/2$ радиан, чем он отличается

от полуволнового НР ($S=\pi$ радиан), несмотря на сходство их конструкций. Подключение короткозамкнутого отрезка 6 непосредственно к средней части короткозамкнутого отрезка 3 (рис. 2d) повышает жёсткость конструкции РРЦ, снижает погонные токи в районе закорачивающего устройства, но при этом несколько возрастают скин-потери в стенках и габариты.

3-ий тип. РРЦ с параллельно подключёнными отрезками, нагруженными ёмкостями (рис.3).

В РРЦ к короткозамкнутому отрезку 1 подключены два отрезка 2, нагруженные на ёмкости C_2 . Особенность резонаторов этого типа – малые продольные размеры в сравнении с НР за счёт развитой ёмкостной части и, соответственно, бо́льшей эквивалентной ёмкости. Резонатор без подключённого дополнительного отрезка возбуждается на более высокой частоте. РР этого типа могут возбуждаться на фиксированной частоте и в диапазоне частот.

РР, представленный на рис. 3(а), предназначен для системы внешней монохроматизации выведенного пучка циклотрона У-240 [3], позволяющей получить энергетический разброс пучка не хуже $2 \cdot 10^{-4}$. Рабочий диапазон частот резонатора 13,5 – 36,0 МГц, расстояние между двумя ускоряющими зазорами равно $2l_2 = 1,4$ м, напряжение в зазорах 100 кВ. Перестройка частот в резонаторе производится поворотом панелей 3 на угол $\alpha = 60^\circ$ и перемещением закорачивающего устройства 4 в отрезке 1. По своим возможностям способы перестройки равнозначны, что позволяет выбрать оптимальный режим работы РР по скин-потерям в стенках. У резонатора $S = \pi/2$ радиан. Рассматриваемый РР для заданных требований обладает меньшими скин-потерями и габаритами, чем НР. Резонатор возбуждается на синфазной моде. На рис. 3d представлен РР, возбуждаемый на противофазной моде (электрическое поле в зазорах направлено одинаково относительно движения заряженных частиц), что достигается подключением к отрезку 2 дополнительного отрезка l_4 с суммарной относительной длиной равной $\pi/2$ радиан. В РР может быть подключено несколько отрезков нагруженных ёмкостью, они могут иметь различную конфигурацию и могут быть подключены в любом месте вдоль короткозамкнутого отрезка (поз.5).

4-ый тип. РРЦ с параллельно включённым индуктивным элементом (рис. 4).

При включении индуктивного элемента между проводниками частота четвертьволнового резонатора возрастает скачком, а при расположении элемента в районе разомкнутого конца увеличивается более чем в два раза. Однако на высоких частотах максимальная амплитуда напряжения возбуждается в средней части РР, а не в районе разомкнутого конца, что нежелательно для резонаторов циклотронов. Целесообразно этим способом изменять частоту резонатора в 1,4-1,6 раза. На рис. 4 представлен вариант конструкции переключаемого индуктивного элемента для резонатора циклотрона. Конструкция состоит из проводящей трубы 8, прикреплённой к штоку 3, и вакуумного изолятора 9, установленного между внешним проводником 10 и трубой 8. Включение индуктивного элемента осуществляется установкой металлического кольца 11 между трубой 8 и внешним проводником 10. Подключением элемента изменяется частота резонатора дискретно. Для осуществления плавной перестройки РРЦ снабжается дополнительным устройством, например, перемещаемыми трёхзвенными панелями 4. Использование индуктивного элемента позволяет уменьшить погонные токи в закорачивающем устройстве, а в некоторых конструкциях снизить скин-потери в стенках резонатора [4]. У рассматриваемого типа резонатора $S = \pi/2$ радиан.

5-ый тип. РРЦ с параллельно включённой ёмкостью (рис. 4).

В резонаторе (рис.4) ёмкость формируется между перемещаемой около оси П-образной пластиной 5, закреплённой к плакировке камеры 2 около дуанта 1, и стенками штока 3. При размещении пластины около штока формируется максимальная ёмкость, и, следовательно, РРЦ возбуждается на самой низкой частоте. Ёмкость используется для плавной перестройки и понижения частоты резонатора на 20-25% [5]. У резонатора $S = \pi/2$ радиан.

6-ой тип. РРЦ с последовательно включённым короткозамкнутым отрезком полосковой линии.

В этот тип попадают резонаторы с широкодиапазонной перестройкой частоты, осуществляемой перемещением трёхзвенных панелей 4 из положения А в положение В (рис.4), в районе которых резонатор возбуждается на высших и низших частотах соответственно. В положении А звенья 6 панелей 4 и стенка плакировки 2 при прямоугольной форме проводников образуют короткозамкнутый отрезок полосковой линии 7, который понижает частоту резонатора. То есть короткозамкнутый отрезок влияет на параметры резонатора аналогично индуктивности, последовательно включённой отрезкам передающих линий. Например, в резонаторе циклотрона МГц-20 [5] понижение частоты достигает 0,81 МГц и резонатор возбуждается на частоте 25,3 МГц вместо 26,1 МГц. Нижняя частота диапазона 10,1 МГц. У резонатора $S = \pi/2$ радиан. Рассматриваемый широкодиапазонный РРЦ компактнее и надёжнее в сравнении с НР с плунжерной перестройкой частоты. Однако РРЦ обладает большей мощностью скин-потерь на высоких частотах, чем НР.

7-ой тип. РРЦ с последовательно включённым конденсатором (рис. 5).

К этому типу относятся резонаторы с диапазонной перестройкой частоты, осуществляемой поворотом однозвенных панелей 1 около оси к штоку 2 с прикреплённым на торце дуантом [6]. Панели одним торцом присоединены к плакировке 3, а вторые торцы их снабжены пластинами 4, которые со стенкой бака 5 формируют ёмкость С. В резонаторе ёмкость включена последовательно отрезкам передающих линий и место включения вдоль резонатора изменяется при повороте панелей. Резонатор с подключённой ёмкостью возбуждается на более высокой частоте, чем без неё. У этого типа резонатора $S = \pi/2$ радиан. В сравнении с НР этот тип резонатора имеет бо́льшие поперечные размеры и скин-потери на высоких частотах, чем НР.

РРЦ могут включать в себя несколько дополнительных конструктивных элементов.

Расчёты РРЦ могут быть проведены аналитическими методами – методом матричного исчисления [7] или методом телеграфных уравнений [8], и численными методами – с помощью программ ISFEL3D, MAFIA и др. Аналитические и численные методы расчётов РР не исключают друг друга, а дополняют. На этапе разработки и оптимизации РРЦ целесообразно пользоваться аналитическими методами, а на этапе отработки конечной геометрии – численными методами.

Список литературы

1. Ворогушин М.Ф., Богданов П.В., Мудролюбов В.Г., Смирнов Ю.В. Компактная ускоряющая система для циклотронов. – В сб.: XV Совещание по ускорителям заряженных частиц. Протвино. 1996. Т.1. С. 188.
2. Козиенко М.Т., Смирнов Ю.В., Степанов А.В. Особенности ускоряющей системы для кольцевого циклотрона с отдельными секторными магнитами. – В сб.: XV Совещание по ускорителям заряженных частиц. Протвино. 1996. Т.1. С. 149.
3. Малышев И.Ф., Мудролюбов В.Г., Смирнов Ю.В. Коаксиальный резонатор с разветвлённой формой проводников. – В сб.: Электрофизическая аппаратура. М. Атомиздат. 1979. Вып.17. С.75.
4. Мудролюбов В.Г., Смирнов Ю.В. Ускоряющая система изохронного циклотрона. – В сб.: Электрофизическая аппаратура. М. Атомиздат. 1979. Вып. 17. С. 80.
5. Богданов П.В., Малышев И.Ф., Мудролюбов В.Г., Перегуд В.И., Смирнов Ю.В., Фелелов П.А. Резонансная система компактного изохронного циклотрона. Препринт НИИЭФА им. Д.В. Ефремова. Л. 1978. А-0372.
6. Circular Particle Accelerator of the Cyclotron Type. Патент Великобритании. №1.022.739. кл. Н1Д.
7. Смирнов Ю.В. Расчёт разветвлённого коаксиального резонатора с использованием аппарата теории матриц. – В сб.: Вопросы атомной науки и техники. Серия: Электрофизическая аппаратура. Л. Энергоиздат. 1984. Вып. 21. С. 62.
8. Смирнов Ю.В. Коаксиальный резонатор сложной формы. – В сб.: Электрофизическая аппаратура. М. Энергоатомиздат. 1982. Вып. 20. С. 14.

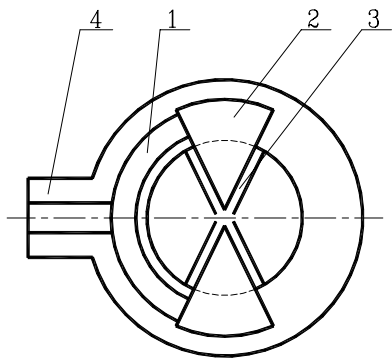


Рис. 1. РРЦ 1-го типа.

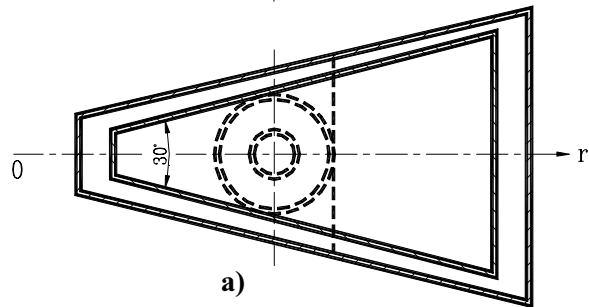
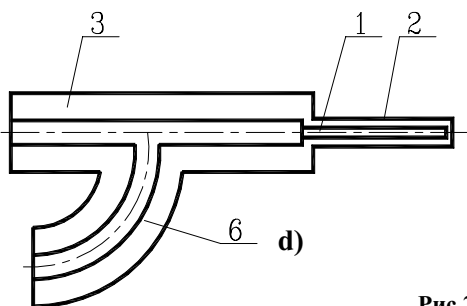
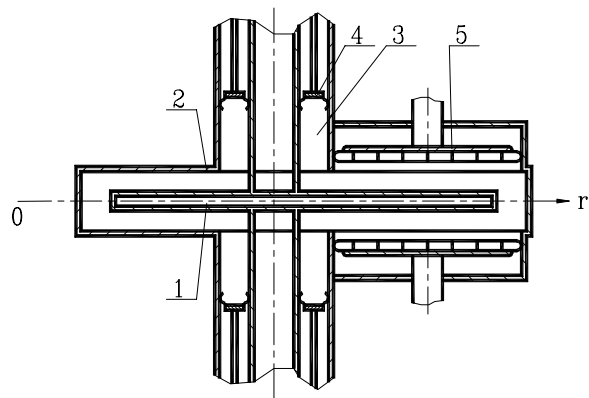


Рис.2. РРЦ 2-го типа.

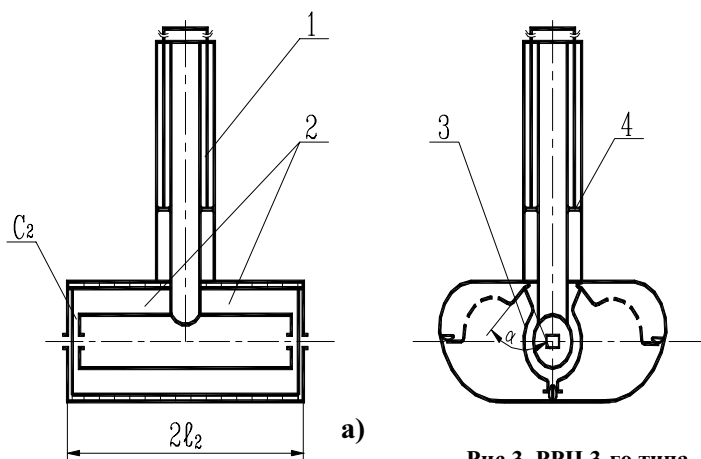


Рис.3. РРЦ 3-го типа.

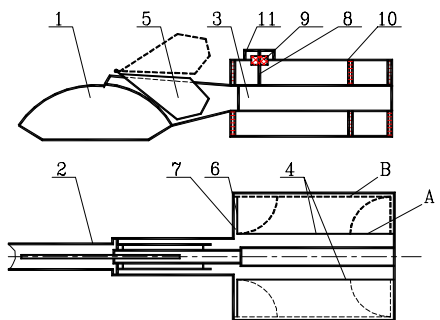
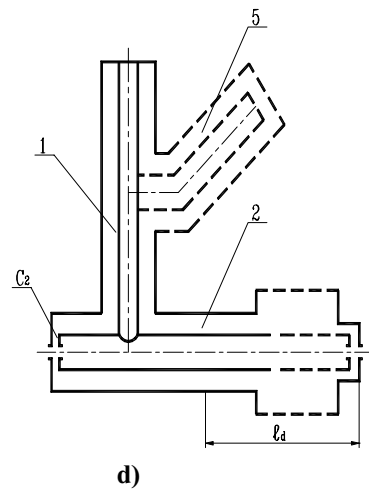


Рис.4. РРЦ 4-5-6-го типов.

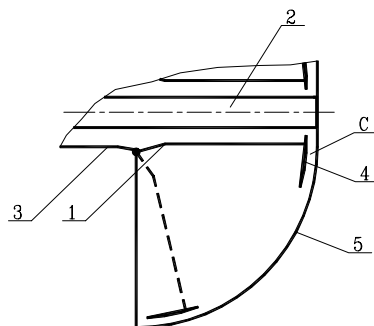


Рис.5. РРЦ 7-го типа.