



Циклотрон с радиально бегущей волной магнитного поля

Е. Г. Комар

В статье рассмотрены возможные схемы конструкции циклотрона с радиально бегущей волной магнитного поля, а также соотношения между основными параметрами циклотрона такого типа, предложенного автором. При помощи специальных кольцевых обмоток, питаемых от генераторов переменного тока, в зазоре между полюсами магнита циклотрона образуется одна или несколько concentрических радиально бегущих волн магнитного поля.

Предложены два варианта. В первом такой бегущей волной является поле, в котором происходит ускорение частиц. Во втором бегущая волна накладывается на обычное для циклотронов постоянное магнитное поле, и ускорение происходит в суммарном поле. Пространственное распределение поля в волне обеспечивает получение области устойчивости ($1 > n > 0$), которая должна перемещаться в радиальном направлении с радиальной скоростью частиц. Область устойчивости обеспечивается и в том случае, если абсолютное значение магнитного поля в зоне ускорения будет резко возрастать от центра к наружному диаметру.

Предлагаемая система принципиально позволяет построить циклотрон на сколь угодно большие энергии. Несмотря на цикличность действия этого ускорителя, есть основание предполагать, что средняя интенсивность в нем может быть больше, чем в фазотроне, из-за лучшей фокусировки.

Приведены примерные расчеты ускорителей предлагаемого типа на различные энергии. Расчеты показывают, что вес и габариты таких ускорителей могут быть гораздо меньше, чем ускорителей других типов на те же энергии.

Общие соображения

Предлагаемый циклотрон отличается от обычного тем, что частицы разгоняются в кольцевой волне магнитного поля, движущейся радиально от центра машины. Схема получения такой волны представлена на рис. 1. (Показана только одна волна поля; их может быть несколько.)

Скорость движения волны v_r должна быть такой, чтобы частицы в течение всего времени ускорения находились в том участке магнитного поля, где выполняется условие $0 < n < 1$. Для этого радиальная составляющая скорости частиц, определяемая величиной ускоряющего напряжения, и радиальная скорость волны поля должны совпадать.

В данном ускорителе можно увеличивать магнитное поле по мере перехода волны на больший радиус, сохраняя при этом условие вертикальной фокусировки. Это дает возможность поддерживать постоянство час-

тоты ускоряющего напряжения в области, где частицы становятся релятивистскими, т. е. такой циклотрон может быть построен на сколь угодно большие энергии.

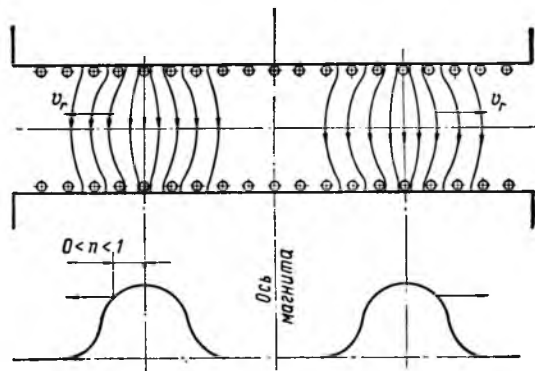


Рис. [1. Схема получения радиально бегущей волны магнитного поля при помощи специальных круговых проводников, расположенных на поверхностях полюсов магнита.

Следует отметить, что в данном случае можно выбрать значения n , обеспечивающие большие мгновенные интенсивности частиц по сравнению с обычным циклотроном или фазотроном.

Повышению интенсивности будет способствовать то обстоятельство, что в центральной части ускорителя при малых значениях напряженности поля воздушный зазор может быть выбран достаточно большим и уменьшается по мере увеличения энергии. Несмотря на то, что в данном ускорителе, как и в фазотроне, частицы разгоняются порциями, следует ожидать, что средняя интенсивность будет большей из-за лучших условий магнитной фокусировки. Естественно, что по сравнению с синхрофазотроном средняя интенсивность будет на несколько порядков выше.

Возможные конструктивные схемы

На рис. 2 представлена схема одной из возможных конструкций электромагнита предлагаемого ускорителя. Вакуумная камера

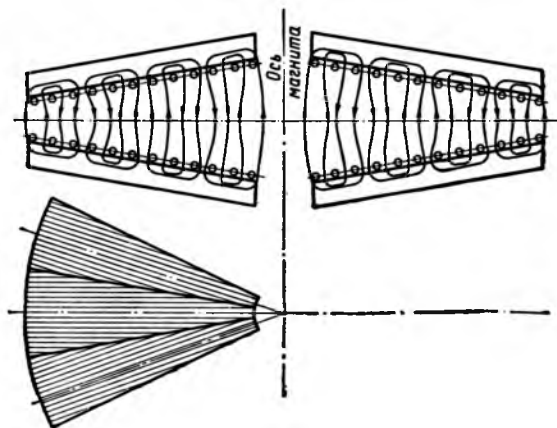


Рис. 2. Схема одной из возможных конструкций электромагнита ускорителя.

Показано несколько концентрических волн магнитного поля (многополюсная система). Внизу — вариант радиальной шихтовки полюсных башмаков.

помещается между двумя дисками, имеющими коническую форму и набранными из листового железа с радиальной шихтовкой, которые одновременно являются полюсами и магнитопроводом. Диски состоят из отдельных секторов, шихтовка которых показана на рис. 2. На поверхностях дисков, обращенных

друг к другу, расположены кольцевые концентрические обмотки.

Питание обмоток может быть осуществлено различными способами. Например, если разбить их на несколько групп, разместив соответствующим образом, и питать от сети трехфазного тока, то, как известно из тео-

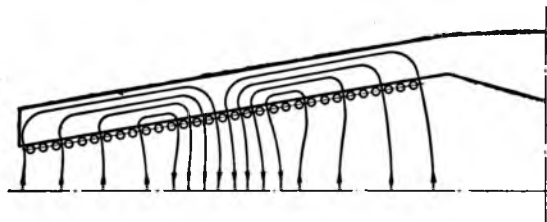


Рис. 3. Вариант конструкции с одной волной магнитного поля, при которой силовые линии дважды замыкаются через зазор.

рии электрических машин, можно легко создать магнитное поле (рис. 2), волны которого будут перемещаться в радиальном направлении со скоростью, зависящей от частоты переменного тока и от шага обмотки. Силовые линии замыкаются через шихтованные диски. Создается как бы многополюсная си-

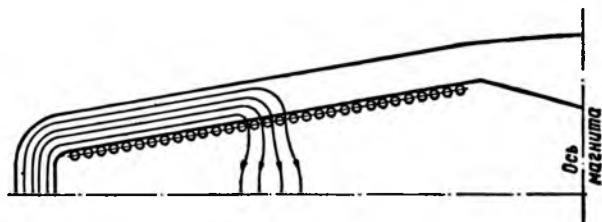


Рис. 4. Вариант конструкции, при которой силовые линии магнитной волны один раз проходят через воздушный зазор и замыкаются через специальное ярмо на внешнем диаметре полюсных башмаков.

стема, в которой толщина дисков сравнительно невелика, благодаря чему существенно уменьшается вес магнитопровода.

На рис. 3 показан другой вариант конструкции. Здесь имеется всего лишь одна волна магнитного поля. Силовые линии замыкаются либо через воздушный зазор машины (рис. 3), либо через специальное ярмо, расположенное на внешней цилиндрической поверхности ускорителя (рис. 4).

Варианты, представленные на рис. 3 и 4, требуют применения специальных коммутрующих устройств, которые, по-видимому,

легче всего выполнить с помощью ионных вентилях. Для уменьшения реактивной мощности можно осуществить рекуперацию магнитной энергии волны при переходе из одной точки пространства в другую.

В предлагаемом ускорителе величина воздушного зазора может быть очень мала ($\sim 5-10$ см на максимальном радиусе).

Напряженность поля на конечном радиусе наибольшая, ее можно выбирать с учетом магнитных свойств железа и возможности

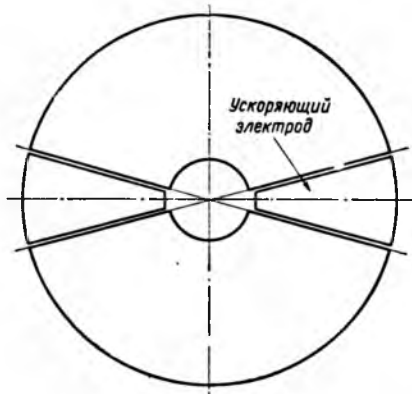


Рис. 5. Схема расположения ускоряющих электродов.

размещения обмотки; для обычной электро-технической стали целесообразно создавать напряженность поля порядка 20 000 э.

Поскольку скорость движения магнитной волны ограничена, прирост энергии за оборот должен быть порядка сотен или тысяч вольт. Хотя при таком напряжении требуется сравнительно высокий вакуум в камере, но значительно снижается мощность высоко-частотного генератора и упрощается конструкция ускоряющей системы.

В ускорителях на малые энергии целесообразно применять дуанты. В больших машинах ускорение можно осуществлять специальными секторными электродами, помещенными в промежутках между секторами магнитных дисков (рис. 5). Диски целесообразно разрезать также для удобства присоединения вакуумных насосов.

При проектировании предлагаемого ускорителя возникнут большие трудности с разработкой системы инъекции. В настоящей статье инъекция частиц в поле движущейся магнитной волны детально не рассматривается. В малых и средних ускорителях централь-

ную часть можно выполнить в виде обычного циклотрона, как это схематически показано на рис. 6. Здесь обмотка *A* создает поле начального циклотрона; обмотки *B* возбуждают бегущую волну магнитного поля.

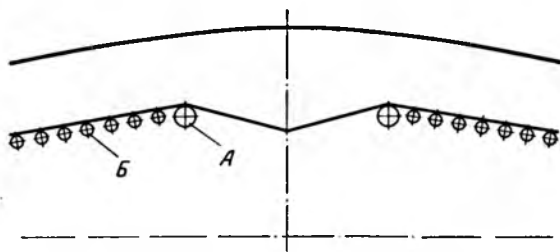


Рис. 6. Одна из возможных схем инжекторной части ускорителя:

A—обмотка центрального инжектирующего циклотрона; *B*—обмотки, создающие радиально бегущую волну магнитного поля.

Возможны и другие варианты инжекторной части ускорителя, в частности применение линейных ускорителей, синхрофазотронов и фазотронов.

Отдельно следует рассмотреть конструктивную схему циклотрона, в котором на постоянное магнитное поле накладывается

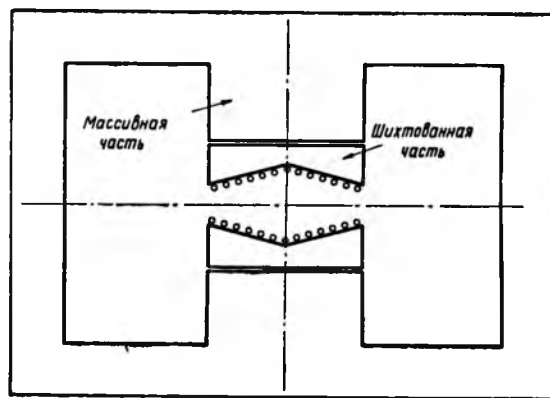


Рис. 7. Конструктивная схема циклотрона, в котором на постоянное магнитное поле Ш-образного электромагнита накладывается радиально бегущая волна магнитного поля.

бегущая волна магнитного поля. В этом случае магнитопровод ускорителя такой же, как в обычном циклотроне или фазотроне (рис. 7). Башмаки полюсов, которые конструктивно могут являться элементами вакуумной камеры, выполняются из шихтованного железа. Вес электромагнита в такой конструкции того же порядка, что и в обыч-

Таблица 1

Конечная энергия, Мэв	Конечный радиус орбиты, см	Напряженность поля в зазоре в начале ускорения, э	Частота обращения частиц, Мгц	Вес железа, т	Мощность питания, кка	
					питание всей обмотки без коммутации	питание двух волн без рекуперации
100	74	18 000	27,6	4	37 000	—
1 000	284	9 750	14,5	60	550 000	108 000
10 000	1810	1 720	2,64	2 400	—	750 000
50 000	8500	367	0,56	53 000	—	—

ных циклотронах и фазотронах, однако описанный выше эффект позволяет получить циклотрон на очень большие энергии.

Ввиду специфичности конструкции варианта циклотрона с постоянным полем ниже он будет рассмотрен отдельно.

Соотношения между основными параметрами и примерные расчеты для варианта без постоянного магнитного поля

Для обеспечения постоянства частоты обращения частицы, а следовательно, и частоты ускоряющего напряжения напряженность поля на всех радиусах

$$H = H_0 \left(1 + \frac{W}{E_0}\right), \quad (1)$$

где H_0 — напряженность поля в начале ускорения, когда $W=0$. Если W_m — энергия на конечном радиусе (номинальная энергия ускорителя), а H_m — максимальная напряженность поля на конечном радиусе, то начальная напряженность поля

$$H_0 = \frac{H_m}{1 + \frac{W_m}{E_0}}.$$

Радиус орбиты частицы при данных значениях ее кинетической энергии и магнитного поля для протонов равен (см)

$$r = \frac{V W (W + 2E_0)}{300 H}, \quad (2)$$

где W — кинетическая энергия частиц (эв); E_0 — энергия покоя частиц (эв); H — напряженность поля (э). Заменяя H его значением из (1), имеем

$$r = \frac{V W (W + 2E_0)}{300 H_0 \left(1 + \frac{W}{E_0}\right)},$$

$$\frac{dr}{dW} = \frac{E_0^3}{300 H_0 V W (W + 2E_0) (W + E_0)^2}.$$

Откуда шаг спирали

$$\Delta_r = u \frac{dr}{dW} = \frac{u E_0^3}{300 H_0 (W + E_0)^2 V W (W + 2E_0)}, \quad (3)$$

где u — энергия, получаемая частицей за оборот.

Период обращения частицы

$$T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi r}{c} \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{E_0}{W + E_0}\right)^2}},$$

где v — скорость движения частицы (см/сек); c — скорость света (см/сек).

Радиальная составляющая скорости частицы

$$v_r = \frac{\Delta r}{T} = \frac{uc}{600 \pi H_0 r} \left(\frac{E_0}{W + E_0}\right)^3. \quad (4)$$

Из формулы (4) следует, что скорость движения магнитной волны в центральной части ускорителя должна быть значительно больше, чем на конечной орбите.

В табл. 1 приведены некоторые параметры ускорителей на различные энергии. При расчете этих параметров принято: $H_0=20\,000$ э, величина магнитного зазора $\delta=7,5$ см, частота питания * намагничивающих обмоток $f=50$ гц.

Для расчета веса активного железа толщина дисков принята равной 15 см. В расчете не учтен вес вспомогательных конструкций, который в ускорителях больших размеров может быть значительным (верхний диск должен поддерживаться в нормальном положении довольно сложной конструкцией мостового типа).

При проектировании может оказаться, что для размещения намагничивающих обмоток потребуется больший зазор между полюсами, чем принято в расчете, и значения мощностей могут увеличиться. Для ускорителя на 100 Мэв реактивная мощность вычислена

для варианта питания обмотки возбуждения непосредственно от сети переменного тока. Использована система создания бегущего поля при трехфазном переменном токе, применяемая в обычных электрических машинах. Для ускорителя на 1000 $Mэв$ расчет мощности сделан для непосредственного питания от сети переменного тока и для случая применения коммутирующей системы без рекуперации магнитной энергии на отдельных участках обмотки возбуждения. Для ускорителя на 10 000 $Mэв$ приведены цифры мощности только для случая применения коммутирующей системы без рекуперации магнитной энергии.

Для самого большого ускорителя на 50 000 $Mэв$ мощность питания не рассчитывалась. Сооружение этой машины возможно лишь с применением системы рекуперации магнитной энергии.

Цифры, приведенные в табл. 1, показывают, что с экономической точки зрения целесообразность сооружения ускорителей такого типа может обсуждаться.

Таблица 2

$W, Mэв$	$H, э$	$r, см$	$v_r, м/сек$
10	18 200	25,2	38,7
20	18 400	39,3	24,2
40	18 800	49,1	18,2
60	19 150	53,3	14,1
80	19 500	67,7	11,9
100	20 000	74	10,1

Таблица 3

$W, Mэв$	$H, э$	$r, см$	$v_r, м/сек$
15	9 800	57,3	422
50	10 200	101,5	214
100	10 800	137,5	136
300	12 900	209	54
500	14 900	244	28,9
1000	20 000	284	10

В табл. 2 приведены значения напряженности магнитного поля и скорости движения магнитной волны для различных радиусов

орбиты циклотрона на 100 $Mэв$, а в табл. 3 — те же параметры циклотрона на 1000 $Mэв$.

Ускоряющее напряжение U для циклотрона на 100 $Mэв$ принято равным 115 $э$, для циклотрона на 1000 $Mэв$ — 1540 $э$.

Радиальные скорости движения магнитного поля, приведенные в табл. 2 и 3, и соответствующие им значения ускоряющих напряжений относятся к варианту постоянного значения ускоряющего напряжения. Однако, если в течение цикла ускорения изменять амплитуду ускоряющего напряжения, можно добиться постоянной или почти постоянной скорости движения волны при всех радиусах орбиты частиц. Это значительно облегчит конструирование кольцевых обмоток возбуждения.

Для простоты рассмотрения и расчетов величины ускоряющих напряжений определены без учета необходимости компенсации электродвижущей силы вихревого поля. Нетрудно показать, что радиально движущаяся волна магнитного поля вызывает вихревое электрическое поле, вектор которого направлен против вектора ускоряющего напряжения. Для компенсации влияния вихревого электрического поля ускоряющее напряжение должно быть выбрано большим, чем приведенное выше.

Соотношения между основными параметрами и примерные расчеты для варианта с постоянным магнитным полем

Формулы (1)–(4) справедливы и для варианта наложения волны радиально бегущего магнитного поля на постоянное (см. рис. 7). Как показано на рисунке, шихтованные башмаки полюсов выполнены таким образом, что по мере увеличения радиуса орбиты ускоряемых частиц зазор постепенно уменьшается. Это уменьшение зазора должно быть таким, чтобы напряженность поля в зависимости от энергии определялась формулой (1).

На рис. 8 приведена кривая напряженности магнитного поля, подсчитанная для электромагнита с наружным диаметром полюсов ~ 700 $см$.

Для обеспечения условий фокусировки на постоянное магнитное поле должна быть наложена бегущая волна, обеспечивающая кольцевую зону с $0 < n < 1$. Такое наложение бегущей волны на постоянное магнитное

поле графически представлено на рис. 9. Через кольцевую группу проводников шириной l , начиная с радиуса r_1 , протекает ток I . При помощи специальной коммутирующей схемы радиус этой группы увеличивается,

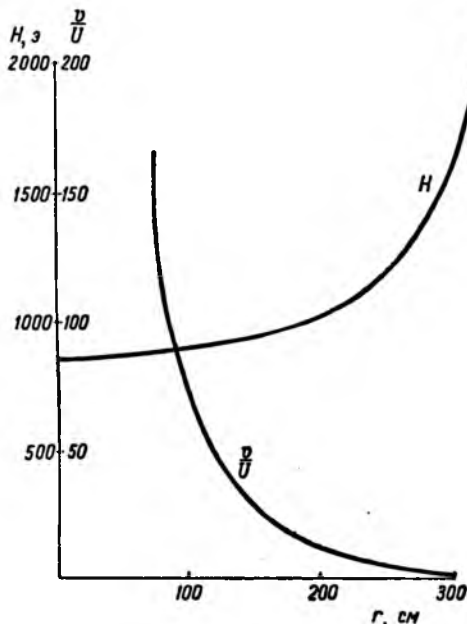


Рис. 8. Кривые напряженности магнитного поля и отношения скорости движения волны к ускоряющему напряжению для циклотрона с постоянным магнитным полем при диаметре полюсов ~ 700 см.

соответственно увеличивается и радиусокружности, ограничивающей создаваемый группой проводников магнитный поток.

Суммирование постоянного и переменного магнитных потоков образует кольцевую зону, в которой n имеет нужное нам значение.

Если $\left(\frac{dH}{dr}\right)_1$ и $\left(\frac{dH}{dr}\right)_2$ — абсолютные значения производной кривой напряженности магнитного поля по радиусу постоянного потока и суммарной напряженности в кольцевой зоне, то общее значение тока, протекающего

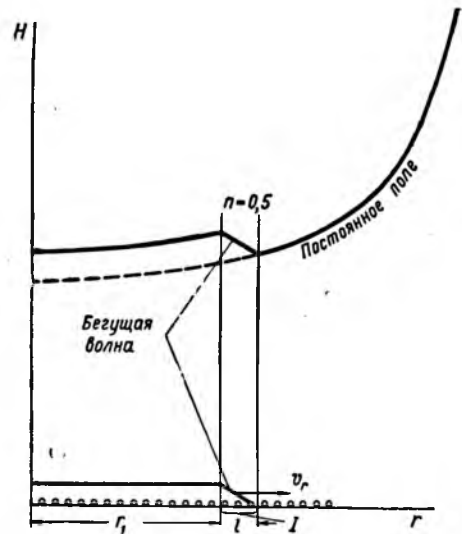


Рис. 9. Схема наложения бегущей волны магнитного поля на постоянное поле циклотрона.

через проводники обмотки, в сечении кольцевой зоны шириной l

$$I = 0,8\delta_1 l \left[\left(\frac{dH}{dr}\right)_1 + \left(\frac{dH}{dr}\right)_2 \right], \quad (5)$$

где δ_1 — величина зазора для радиуса r .

Электродвижущая сила, вызываемая бегущей волной магнитного потока в группе проводников шириной l , может быть под-

Т а б л и ц а 4

r , см	W , Мэв	H , э	$\left(\frac{dH}{dr}\right)_1$	$\left(\frac{dH}{dr}\right)_2$	v_r , м/сек	u, b при $v_r = \text{const} = 100$ м/сек	δ , см	l , см	I , а
0	0	8 600	—	—	—	—	61,2	—	—
76	20	8 750	—	—	595	437	—	—	—
113	50	9 100	8,7	40	365	705	58	58	131 000
155	100	9 550	10	31	230	1 130	55	—	—
213	200	10 300	24,3	24,2	127	2 050	51	—	—
276	500	13 200	61	24,1	48,7	5 340	39,8	39,8	107 000
305	800	15 900	108	26,2	24,9	10 400	33	—	—
318	1000	17 700	167	27,8	17,1	15 200	29,7	—	—
327	1200	19 600	250	30	12,5	20 850	27	—	—
332	1350	21 000	415	31,8	10	26 100	25	25	224 000

считана по следующей формуле:

$$E = 2\pi r \frac{I}{0,8\delta_1} v_r \cdot 10^{-8} = 12,3r \frac{I}{\delta_1} v_r \cdot 10^{-8} \text{ в.}$$

В табл. 4 приведены некоторые результаты примерного расчета для варианта с электромагнитом, имеющим диаметр полюсов ~ 700 см.

Мощность питания кольцевых обмоток в этом варианте при отсутствии рекуперации энергии и скорости одной волны порядка 100 м/сек составит 2—3 тыс. кка. Эта мощность пропорциональна частоте циклов, а следовательно, и интенсивности.

Величина ускоряющего напряжения, приведенная в табл. 4, рассчитана для постоянной скорости движения волны. В действительности целесообразнее исходить из по-

стоянства мощности, потребляемой кольцевыми обмотками в течение цикла. В этом случае скорость волны должна постепенно уменьшаться при увеличении радиуса орбиты. Как и в предыдущих расчетах, здесь не учтено вихревое электрическое поле.

Заключение

В описании предлагаемого ускорителя изложены лишь общие принципы, некоторые возможные варианты конструктивной схемы, а также примерные расчеты. Эти данные свидетельствуют о целесообразности дальнейшей расчетной, конструктивной и экспериментальной разработки предлагаемых систем.

Поступила в Редакцию 6/I 1959 г.

