

ВОЛНОВОДНЫЙ ЭЛЕКТРОННЫЙ ЦИКЛИЧЕСКИЙ УСКОРИТЕЛЬ

А. А. ВОРОБЬЕВ, А. Н. ДИДЕНКО, Е. С. КОВАЛЕНКО

Введение

Волноводный циклический ускоритель электронов, предложенный А. А. Воробьевым, на наш взгляд, сочетает в себе основные достоинства линейных и циклических ускорителей.

С одной стороны, являясь циклическим ускорителем, он может ускорять частицы до очень больших энергий при сравнительно небольшой длине волновода. С другой стороны, являясь волноводным ускорителем, он в принципе может обеспечить очень высокие приросты энергии за один оборот. На современном этапе развития ускорительной техники эти качества делают такую установку весьма перспективной.

Подобные ускорители могут быть двух вариантов: с внешним управляющим полем и без него. В последнем случае управление частицами осуществляется высокочастотным полем самой волны. Этот вопрос был рассмотрен нами, но мы не будем касаться его здесь, а ограничимся изложением лишь основных положений, относящихся к волноводному циклическому ускорителю с управляющим полем.

В принципе такой ускоритель будет отличаться от обычного синхротрона только характером в. ч. поля и отсутствием прямолинейных участков. Действительно, если в. ч. поле синхротрона имеет только одну компоненту поля E_φ , спадающую по радиусу как $\frac{1}{r}$, то в. ч. поле волновода имеет все компоненты, сложным образом зависящие от r и z . С этой точки зрения волноводный циклический ускоритель с управляющим полем можно назвать синхротроном с обобщенным в. ч. полем. Что касается отсутствия прямолинейных участков, то это свойство волноводных ускорителей, будучи несущественным при сравнительно малых энергиях и больших временах ускорения, может оказаться очень важным в тех случаях, когда радиационные потери сильно увеличиваются, или когда необходимо обеспечить большой прирост энергии за оборот. Это объясняется тем, что в этих случаях необходимо в обычных синхротронах установить столько резонаторов, что суммарная длина прямолинейных участков может превысить ту, при которой движение частиц будет устойчивым. Такого нарушения устойчивости не будет в волноводных ускорителях.

Схематически ускоряющая система волноводного циклического ускорителя с управляющим внешним полем изображена на рис. 1.

Остальные узлы ускорителя не особенно сильно отличаются от аналогичных узлов обычного синхротрона. Из рис. 1 видно, что отличие заключается только в том, что ускоряющая система данного ускорителя представляет не совокупность резонаторов, а выполняется в виде изогнутого диафрагмированного волновода, который одновременно должен быть и камерой ускорителя.

Применение волноводов позволяет создать такие условия, при которых частицы будут ускоряться не на коротких участках пути, как в синхротронах, а в каждой точке траектории. Это достигается использованием волн, замедленных до скорости частиц, т. е. в данном случае до скорости света. В качестве замедляющих систем могут быть использованы любые из известных систем. Так как замедление, которое требуется в данном случае, невелико и требования на широкополосность системы фактически отсутствуют, то подходящими для нашей

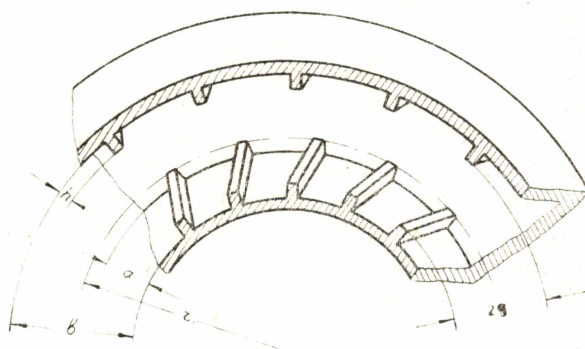


Рис. 1.

цели являются простые и сдвоенные гребенки. Могут быть использованы и круглые диафрагмированные волноводы, однако при этом часть межполюсного пространства по высоте оказывается занятой диафрагмами. Это приводит к увеличению межполюсного расстояния, а следовательно, к удорожанию магнитной системы ускорителя. Поэтому почти все расчеты, связанные с данным ускорителем, были проведены для двойной гребенки, образующей боковые стенки камеры (рис. 1).

Техническое осуществление волноводного циклического ускорителя требует рассмотрения целого ряда вопросов, тесно связанных между собой. Они и были рассмотрены нами. Так, был рассмотрен вопрос о движении частиц в обобщенном высокочастотном поле, исследовано поведение волновода в переменном магнитном поле, исследована электродинамика изогнутых диафрагмированных волноводов, освоена методика измерения фазовых скоростей и распределения полей внутри волноводов, рассмотрен вопрос о технико-экономических свойствах систем. Все рассмотренные вопросы позволяют сделать заключение, что данная ускоряющая система может применяться в ускорительной технике наряду с системой из резонаторов. Более того, волноводная система может оказаться предпочтительнее в тех случаях, когда применение резонаторов связано с принципиальными трудностями. Коротко рассмотрим вышеперечисленные вопросы.

Динамика частиц в волноводном ускорителе

Как уже указывалось, от синхротрона волноводный ускоритель отличается лишь характером высокочастотного поля. Это поле имеет, вообще говоря, все компоненты, зависящие от координат сложным

образом. В то время, когда работа по волноводному ускорителю только начиналась, неясно было, к чему приведет это обстоятельство. Более того, можно было предполагать, что именно по этой причине волноводный ускоритель не сможет работать. В ряде работ А. А. Коломенский и А. Н. Лебедев и раньше К. В. Робинзон нашли, что радиальные вариации высокочастотного поля приводят к появлению экспоненциального нарастания амплитуд аксиальных колебаний частиц и в такой же мере к затуханию радиальных бетатронных колебаний. В частности, этот эффект предполагалось использовать для демпфирования колебаний индуцированных излучением в жесткофокусирующих установках.

Проведенные нами расчеты показали, что указанная точка зрения является ошибочной и никаких изменений в декременты затухания высокочастотное поле не вносит. Наличие сложной структуры поля приводит лишь к перераспределению частот бетатронных и синхротронных колебаний, но в общем это перераспределение невелико в большинстве случаев. Условия устойчивости поэтому близки к условиям устойчивости обычного синхротрона и отличаются от них лишь в очень сильных высокочастотных полях. Условия захвата частиц в синхротронный режим ускорения также аналогичны условиям захвата в синхротроне и лишь в том случае, когда сепаратриса примерно равна поперечным размерам камеры, возможно существенное отличие. Отметим, что в волноводе не обязательно должен быть использован режим бегущей волны. С равным успехом могут быть использованы и стоячие волны. Показано, что на динамике частиц это почти не скажется.

В области больших энергий, как и в синхротроне, в волноводном циклическом ускорителе существенно излучение. Поскольку в данной системе возможно распространение волн со скоростью меньшей c , то вместе с обычным излучением здесь возможно дополнительное, черенковское. Расчеты показали, что в основном происходит перераспределение излучения по спектру, но полная величина его почти не изменяется. В целом рассмотренные вопросы динамики показывают, что волноводный циклический ускоритель вполне аналогичен синхротрону и здесь не следует ожидать каких-либо осложнений.

Поведение волновода в переменном магнитном поле

В процессе работы волновод необходимо помещать в переменное магнитное поле. Это приведет к тому, что в нем будут наводиться токи Фуко, которые искажают управляющее магнитное поле внутри волновода. При большой толщине волновода и быстром изменении во времени магнитного поля искажение может быть большим и может привести к нарушению режима ускорения. Строго говоря, этот вопрос надо рассматривать и для обычного бетатрона, поскольку там тоже камера покрыта тонким слоем серебра. Однако для нашего случая это приобретает более важное значение и ясно, что искажение будет сильным, если не принять особых мер.

Этот вопрос был рассмотрен и теоретически и экспериментально. Было показано, что трудности можно избежать, если верхние стенки волновода сделать из стекла или фарфора и покрыть слоем серебра. Толщина слоя покрытия должна равняться 5—6 скин — слоям для длины волны в 10-сантиметровом диапазоне. В этом случае, как показали измерения при помещении такого волновода в переменное поле бетатрона на 15 Мэв, искажение не превышает долей процента.

Электродинамика диафрагмированного волновода

Необходимо отметить, что до начала наших работ электродинамика изогнутых диафрагмированных волноводов была практически совершенно не исследована. Начиная работу, мы располагали только двумя статьями Д. В. Воскресенского, в которых были рассмотрены вопросы распространения волн в изогнутых недиафрагмированных системах. Нами в электродинамическом отношении была исследована система, представляющая собой замкнутый равномерноизогнутый волновод прямоугольного сечения, диафрагмированный по боковым стенкам. Необходимо было рассмотреть, какие типы волн существуют в таких системах, какая волна является наиболее подходящей для нас. Кроме того, выбрав определенный тип волны, необходимо было выяснить, при соблюдении каких условий ее фазовая скорость будет равна скорости света, а также как изменяются ее компоненты по высоте и радиусу.

Было показано, что волны, существующие в диафрагмированных волноводах, удобнее всего классифицировать вдоль оси, параллельной ребрам диафрагм, т. е. в нашем случае вдоль оси z . При такой классификации все волны делятся на 2 типа:

$$LE(E_z = 0) \text{ и } LM(H_z = 0) \text{ -волны.}$$

Кроме того, волны каждого типа могут быть синфазными и противофазными в зависимости от того, являются ли они симметричными или антисимметричными относительно среднего радиуса. Было показано, что наилучшей для нас является симметричная LE_{11} — волна. Дисперсионные свойства этой волны в изогнутом волноводе подробно изучались Б. Н. Морозовым. В частности, им показано, что изгиб волновода ведет к ускорению волны и, следовательно, высота диафрагм, необходимая для замедления волны LE_{11} , в изогнутом волноводе больше, чем в неизогнутом. Расчетные кривые позволяют определить размеры волновода, при которых фазовая скорость LE_{11} — волны на окружности среднего радиуса будет равна скорости частицы. При больших радиусах изгиба влиянием изгиба можно пренебречь и рассматривать волновод как неизогнутый. Электродинамика неизогнутого волновода также подробно изучена нами как теоретически, так и экспериментально.

Кроме дисперсии в волноводе, электродинамика включает в себя определение зависимости от частоты и размеров волновода, таких величин, как добротность, сопротивление связи, шунтовое сопротивление и т. д. На этих величинах подробно остановимся ниже.

Мощность генератора и технико-экономические показатели системы

При определении мощности высокочастотного генератора надо исходить из напряженности электрического поля, необходимой для нормальной работы волноводного ускорителя.

Напряженность поля должна, во-первых, обеспечивать перевод большей части ускоряемых частиц из бетатронного режима в синхротронный и, во-вторых, обеспечивать такой прирост энергии частицы за оборот, который бы соответствовал при заданной равновесной фазе росту магнитного поля. Оба эти требования важны, но в зависимости от конкретных условий существенным становится одно из них. В малых ускорителях с аппертурой камеры, сравнимой с радиусом уста-

новки, существенным является первое требование. Наоборот, для больших установок в конце цикла ускорения, вследствие наличия интенсивного излучения, определяющим становится второе требование.

Сначала рассмотрим ускорители на малые энергии. Для них существенным является первое требование и для его выполнения необходимо, чтобы в момент включения высокочастотного поля радиальные размеры сепаратрисы были больше, чем разброс равновесных орбит пучка в радиальном направлении, который и определяет размеры пучка. В зависимости от того, каков предварительный режим ускорения, эти размеры могут быть различными. Так как размеры сепаратрисы пропорциональны напряженности поля, то ясно, что это условие определяет минимальное значение поля, необходимого для эффективного захвата частиц.

Проведенные конкретные вычисления для ускорителя с бетатронным режимом ускорения и с нижеперечисленными параметрами:

$$\begin{array}{lll} r_s = 13,4 \text{ см}; & g = 3,25 \text{ см}; & \lambda = 9,35 \text{ см}; \\ a = 6 \text{ см}; & E_u = 0,53 \text{ мэв}; & E_s = 3 \text{ мэв} \end{array}$$

(E_u — энергия инжекции, E_s — энергия перехода в синхротронный режим) показали, что минимальная напряженность электрического поля равна 56 в/см

$$\left(V_0 = 4,7 \frac{\text{кв}}{\text{оборот}} \right).$$

Что касается второго требования, то его выполнение для малых ускорителей не связано с какими-либо затруднениями. Действительно, если время ускорения будет равно 3—5 мсек (как в обычном бетатроне), то частица должна за оборот увеличивать энергию на 20—30 эв. В бетатронах это обеспечивается за счет э.д.с. индукции, возникающей при изменении магнитного потока. В нашем случае прирост за оборот равен

$$\Delta E = e V_0 \cos \varphi_s$$

(φ_s — равновесная фаза).

Отсюда видно, что φ_s должно быть выбрано очень близким к 90° . Это очень выгодно с точки зрения захвата частиц в синхротронный режим ускорения, поскольку в этом случае размеры сепаратрисы будут очень большими. В то же самое время это невыгодно с точки зрения использования в. ч. мощности. Практически вся высокочастотная мощность нужна не для ускорения, а для захвата частиц в синхротронный режим. Отметим, что это свойственно не только волноводному ускорителю, а любому синхротрону, у которого отношение ширины камеры к радиусу велико и велика кратность ускоряющей гармоник. Когда излучение становится существенным, то равновесная фаза согласно принципу автофазировки уменьшается и ускоряющая система используется более эффективно.

Теперь определим мощность, необходимую для создания внутри волновода высокочастотного поля такой напряженности. Как известно, характеристикой эффективности любой высокочастотной системы является ее шунтовое сопротивление:

$$R_{ш} = \frac{V_0^2}{P},$$

где P — мощность генератора. Можно показать, что для диафрагмированного волновода, работающего в режиме бегущей волны,

$$R_{ш} = 4 \pi m R_{св} Q \frac{v_{гp}}{c}, \quad (2)$$

где m — кратность в. ч. поля, $R_{св}$ — сопротивление связи, зависящее от распределения поля, Q — добротность, $v_{гp}$ — групповая скорость рассматриваемой волны. Если предположить, что волновод имеет

$$Q = 5000; \quad v_{гp} = 0,1 c; \quad R_{св} = 25 \text{ ом}$$

(эти значения не выходят за пределы технических возможностей; подробнее об этом сказано ниже), то при кратности $m = 9$ получаем, что для такой установки $R_{ш} = 1,4 \text{ мгом}$, т. е. для создания внутри волновода необходимого поля достаточно в. ч. генератора с мощностью 300 вт . Для сравнения укажем, что резонатор синхротрона ФИАН имеет $R_{ш} = 1,2 \text{ ком}$. Для эффективных резонаторных систем $R_{ш}$ могут достигать нескольких мгом , но тем не менее можно показать, что во всех случаях волноводная ускоряющая система будет, по крайней мере, на порядок эффективней резонаторной.

Шунтовое сопротивление системы является наиболее существенным параметром, определяющим эффективность и технико-экономические свойства системы. Вообще вопрос о технико-экономических свойствах является весьма сложным, так как сравнение систем должно производиться как по затратам на изготовление, так и по затратам в процессе эксплуатации всей системы. Именно эти затраты определяются шунтовым сопротивлением. Мы считаем, тем не менее, что в ускорителях на большие энергии, когда всякое увеличение мощности выходит за рамки технических возможностей, шунтовое сопротивление является показателем эффективности системы и его надо исследовать более подробно. Из выше приведенной формулы (2) следует, что для волновода $R_{ш}$ зависит от произведения ряда электродинамических характеристик, которые поэтому целесообразно исследовать более подробно. Проведенный расчет показывает, что все эти характеристики сильно зависят от ширины пространства взаимодействия. Это изображено на рис. 2, на котором для волновода со строго рассчитанными характеристиками дан график шунтового сопротивления $r_{ш}$ на единицу длины. Как видно, оно изменяется от 0,1 до 0,5 $\frac{\text{мгом}}{\text{см}}$. График позволяет быстро определить полное шунтовое сопротивление любой волноводной системы. Так, нетрудно показать, что если даже волновод с $r_{ш} = 0,1 \frac{\text{мгом}}{\text{см}}$ применить в каче-

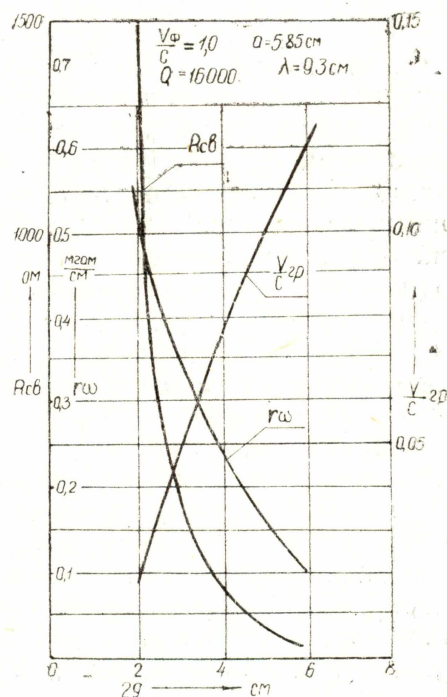


Рис. 2.

стве ускоряющей системы немецкого синхротрона на 6 Бев, то полное шунтовое сопротивление системы равнялось бы 2000 мгом. Чтобы получить такое шунтовое сопротивление в резонаторной системе, необходимо, чтобы каждый из 80 резонаторов, применяемых в этом синхротроне, имел бы шунтовое сопротивление в 25 мгом. В действительности же резонаторы имеют шунтовое сопротивление, равное 2 мгом, т. е. на порядок ниже. Это означает, что, применяя волноводную систему, достаточно было бы в. ч. генератора мощностью не в 400, а примерно в 40 квт. Необходимо отметить и то, что сама ускоряющая система немецкого синхротрона является весьма сложной: 80 резонаторов питаются от клистронного усилителя X-602, изготовленного фирмой „Eimac“, через изогнутый волновод, окружающий всю установку.

Таким образом, с точки зрения достижимых шунтовых сопротивлений волноводная система оставляет далеко позади даже самые современные и высокоэффективные резонаторные системы.

Анализ существующих ускоряющих систем синхротронов и сравнение их с волноводной ускоряющей системой

Ускоряющие системы синхротронов, а особенно синхротронов на большие энергии обычно выполняются в виде большого числа резонаторов. Это обусловлено необходимостью получения чрезвычайно высоких напряжений на оборот для компенсации потерь на излучение. С ростом энергии необходимое число резонаторов должно быстро расти, так как потери энергии пропорциональны E^4 . Это приводит к тому, что быстро растет суммарная длина прямолинейных участков, из-за чего при определенных энергиях возможна потеря устойчивости движения частиц. С этой точки зрения применение резонаторов с высокими $R_{ш}$, требующими наличия прямолинейных участков, возможно в ограниченной области энергий. Что касается применения резонаторов, не требующих наличия прямолинейных участков, то оно исключается вследствие малых шунтовых сопротивлений этих систем. Волноводная ускоряющая система, по-видимому, свободна от вышеперечисленных недостатков: именно она, будучи волноводной, позволяет получить шунтовые сопротивления по крайней мере на порядок выше лучших резонаторных систем и в то же время не требует наличия прямолинейных участков.

Единственный вопрос, который мы еще не рассматривали при сравнении волноводной системы с резонаторами, это вопрос о влиянии увеличения кратности ускоряющей гармоники на работу волноводного ускорителя. Действительно, если в кембриджском и немецком синхротронах длина волны равна 60 см, то в нашем случае она равна примерно 10 см (применять большие длины волн в волноводных циклических ускорителях, по-видимому, не имеет смысла). С одной стороны, увеличение кратности приводит к увеличению тока частиц, захваченных в ускорение, но с другой — к увеличению среднеквадратичного разброса по фазе из-за квантового характера излучения, что является, конечно, весьма нежелательным. Это приводит к тому, что амплитуда в. ч. напряжения должна быть увеличена, если мы хотим, чтобы потери частиц из-за флуктуаций излучения остались примерно теми же. Анализируя формулу Кристи и Робинсона для потерь частиц из-за флуктуаций излучения, можно показать, что потери частиц зависят от некоторого выражения, являющегося сложной функцией равновесной фазы и кратности. Аргументом этой функции будет выражение

$$F(\varphi_s, m) = \frac{1}{m} (\operatorname{tg} \varphi_s - \varphi_s). \quad (3)$$

Поэтому потери частиц для двух ускорителей будут равны, если

$$\frac{1}{m_1} (\operatorname{tg} \varphi_{s1} - \varphi_{s1}) = \frac{1}{m_2} (\operatorname{tg} \varphi_{s2} - \varphi_{s2}). \quad (4)$$

Из этого равенства следует, что с увеличением кратности равновесная фаза должна увеличиться настолько, чтобы равенство не нарушилось. Поскольку потери на излучение мы предполагаем в обоих случаях одинаковыми, это должно вести к увеличению напряжения согласно соотношению:

$$\frac{V_{02}}{V_{01}} = \frac{\cos \varphi_{s1}}{\cos \varphi_{s2}}. \quad (5)$$

Однако с увеличением кратности увеличивается $R_{ш}$ волноводной системы, поэтому отнюдь не очевидно, что с учетом флуктуаций излучения невыгодно переходить на более высокие кратности. Действительно $P = \frac{V_0^2}{R_{ш}}$, поэтому поскольку с увеличением кратности в m раз увеличивается $R_{ш}$, то увеличение кратности даже выгодно в области, где $\frac{V_{02}}{V_{01}} \ll \sqrt{m}$. Расчеты показывают, что такая область существует и включает наиболее приемлемую область равновесных фаз ($0 \leq \varphi_s \leq 50^\circ$).

Выводы

Проведенный анализ позволяет сделать заключение о высокой эффективности волноводной ускоряющей системы электронных циклических ускорителей. Анализ показывает, что эта система может быть применена наравне с резонаторной системой. Кроме того, в тех случаях, когда применение резонаторной системы связано с большими трудностями, применение волноводных систем оказывается даже более предпочтительным. В частности, на наш взгляд, такая система может оказаться незаменимой в безжелезных электронных ускорителях на большие энергии. В этом случае с помощью резонансной системы вообще невозможно компенсировать потери на излучение. Кроме того, в безжелезных установках можно сильно сократить время ускорения, а это позволяет лучше использовать достоинства волноводной ускоряющей системы, в принципе позволяющей обеспечить большие приросты. Наконец, применение малых времен ускорения (десятка мксек, как это имеет место в плазменных ускорителях) сильно удешевит стоимость в. ч. генератора, что является очень важным.