

Письма в ЖЭТФ, том 9, стр.552-556

5 мая 1969 г.

О ПРИМЕНЕНИИ В КОЛЬЦЕВЫХ УСКОРИТЕЛЯХ МАГНИТОВ С ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТЬЮ СИММЕТРИИ

В.Н.Мелехин

В существующих кольцевых ускорителях с жесткой фокусировкой применяются магниты с горизонтальной плоскостью симметрии, которые осуществляют знакопеременную фокусировку частиц по вертикали и радиусу. Очевидно, что это не единственный возможный способ и частицы можно фокусировать по любым другим направлениям, применяя магнитные поля соответствующей конфигурации. Укажем на некоторые особенности системы, фокусирующей частицы по взаимно перпендикулярным направлениям (оси ξ и η на рис.1), повернутым на угол 45° относительно радиального и вертикального направлений. Та-

кое движение реализуется, например¹⁾, при использовании магнитов с вертикальной плоскостью симметрии²⁾, схематически изображенных на рис.1,а и 1,б. Магнитное поле в указанном случае имеет вид

$$H_z = -H_0 + nz, \quad H_\rho = -n\rho, \quad (1)$$

где H_z и H_ρ – вертикальная и радиальная компоненты поля, z и ρ – отклонения от вертикали и радиусу от равновесной орбиты. Заметим, что $n > 0$ в случае, приведенном на рис.1,а и $n < 0$ – на рис.1,б. Из (1) следует, что в линейном приближении величина поля возрастает или убывает по вертикали и не меняется по радиусу.

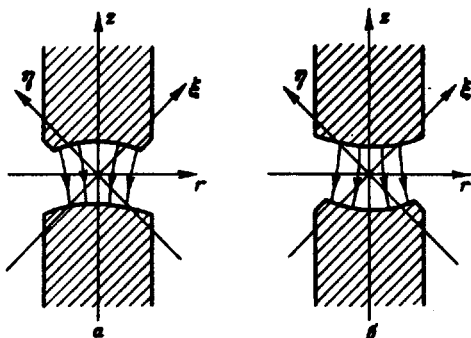


Рис.1. Магниты с вертикальной плоскостью симметрии

Ограничиваясь для простоты системой, состоящей из чередующихся магнитов указанного типа (рис.1,а и 1,б) без промежутков между ними, запишем в координатах ξ, η уравнения поперечного движения

$$\frac{d}{dt}(E\dot{\xi}) - E\omega^2 n \xi = \frac{1}{\sqrt{2}} E \omega^2 R \frac{\Delta p}{p}, \quad (2)$$

$$\frac{d}{dt}(E\dot{\eta}) + E\omega^2 n \eta = -\frac{1}{\sqrt{2}} E \omega^2 R \frac{\Delta p}{p},$$

1) Одна из возможностей заключается в применении магнитной системы с разделенными функциями, в которой фокусирующие элементы ориентированы соответствующим образом, но эту систему мы обсуждать не будем.

2) Как было указано автору А.А.Коломенским, Сигургеерсон предполагал применить подобные магниты в протонном синхрофазотроне на 30 Гэв (ЦЕРН), однако в этом проекте предпочтение было отдано магнитам с горизонтальной плоскостью симметрии [3].

где E , ω и R – равновесные значения энергии, частоты обращения и радиуса, $\Delta p/p$ – отклонение импульса от равновесного значения, а величина n меняет знак при переходе к каждому следующему магниту. Оба этих уравнения совпадают по форме с уравнением радиально-фазо-

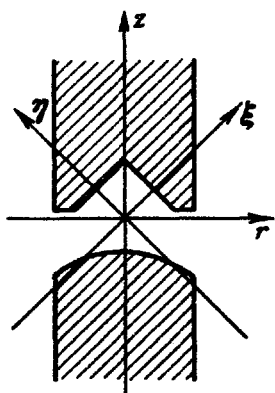


Рис.2. Форма полюсов, обеспечивающая большее значение градиента поля

вых колебаний в обычных кольцевых ускорителях с жесткой фокусировкой, решение которого хорошо изучено (см., например, [1]) и описывает знакопеременную фокусировку. Отсюда следует, что в рассматриваемой системе частицы с равновесной энергией колеблются по осям ξ и η точно так же, как они колеблются по вертикали и радиусу (бетатронные колебания) в обычной системе жесткой фокусировки.

Если энергия частиц отличается от равновесной, то вынужденная часть решения неоднородных уравнений (2) содержит, как и в случае обычных синхротронных колебаний [1], постоянный член и колебательный, период которого равен периоду магнитной системы. По виду уравнений (2) можно заключить, что постоянный член в решениях обоих уравнений совпадает по величине и отличается знаком, а колебательный член полностью совпадает. Отсюда следует, после перехода к координатам r и z , что замкнутая траектория неравновесной частицы смещена по радиусу на постоянную величину, равную среднему радиальному смещению в обычной системе, а по вертикали имеет колебательный характер. За счет этих колебаний и возникает сила второго порядка, удерживающая неравновесные частицы.

Основное преимущество описываемых систем, на наш взгляд, заключается в симметрии поперечного движения: бетатронные колебания совершаются вдоль осей, симметричных относительно радиальной плоскости, выделенной в циклических ускорителях в силу кругового характера движения. Это преимущество проявляется, например, при учете реакции излучения. Как известно, в электронных синхротронах с жесткой фокусировкой радиационные силы раскачивают радиальные бетатронные колебания, что является нежелательным эффектом. Одновременно эти силы демпфируют вертикальные колебания, причем сумма вертикального и радиального декрементов равна нулю [1]. В рассматриваемом нами случае сумма декрементов по-прежнему равна нулю, но теперь, в силу симметрии задачи, они равны друг другу и, следовательно, каждый равен нулю, т.е. раскачки колебаний не происходит. Этот вывод подтверждается прямыми расчетами.

Симметрия системы проявляется и в своеобразном влиянии нелинейности поля. В обычных системах квадратичная нелинейность смещает частоту бетатронных колебаний частиц, энергия которых отличается от равновесной. В рассматриваемой системе, как показывает расчет, указанное смещение частоты отсутствует и осуществляется разностная связь колебаний, если квадратичная нелинейность не нарушает симметрию системы относительно вертикальной плоскости.

Отметим некоторые дополнительные особенности магнитов с вертикальной плоскостью симметрии. Применяя идентичные магниты С-образной конструкции, их можно расположить по одну сторону от вакуумной камеры, на внутреннем или внешнем радиусе. Это упрощает сооружение и эксплуатацию ускорителей по сравнению с обычным случаем, когда магниты приходится размещать по обе стороны от вакуумной камеры. Магниты, форма полюсов которых показана на рис.2, можно использовать в тех случаях, когда по каким-либо причинам необходимо увеличить градиент магнитного поля. И, наконец, чередуя магниты с вертикальной плоскостью симметрии и обычные магниты, можно осуществить так называемую спиральную фокусировку [2], обладающую некоторыми преимуществами.

На наш взгляд, системы с вертикальной плоскостью симметрии представляют несомненный интерес и поэтому необходимо более детальное изучение их свойств и сравнение с существующими системами. Отсут-

ствии радиационной раскачки бетатронных колебаний, характерное для рассмотренных систем, открывает новые возможности в электронных синхротронах на сверхвысокие энергии (например, позволяет увеличить время ускорения) и в электрон-позитронных накопителях.

Институт физических проблем
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
2 апреля 1969 г.

Литература

- [1] А.А.Коломенский, А.Н.Лебедев. Теория циклических ускорителей, М., 1962.
- [2] В.С.Захаров, М.С.Рабинович. ЖЭТФ, 34, 1986, 1964.
- [3] The Theory and Design of an Alternating – Gradient Proton Synchrotron (report, presented at the Conference on the Alternating-Gradient Proton Synchrotron, Geneva, 1953).