

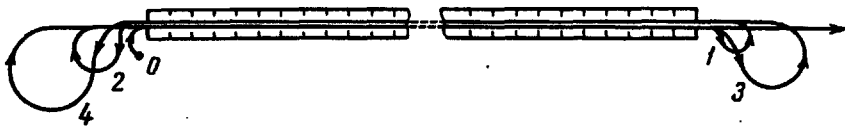
КРАТНЫЙ ЛИНЕЙНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ – ЛИНОТРОН

А.А. Коломенский

Для получения электронов высоких энергий используются либо циклические ускорители (синхротроны) либо линейные ускорители (ЛУ). Масштабы этих установок очень велики: длина ЛУ доходит до нескольких километров,

диаметр синхротрона – до нескольких сотен метров. Переменность магнитного поля приводит к тому, что средняя интенсивность пучка в синхротроне оказывается по крайней мере на два порядка меньше, чем в ЛУ. Еще более резкой станет эта разница при применении криогенных ЛУ непрерывного действия, но затраты на единицу длины криогенных ЛУ будут значительно выше, чем для обычных ЛУ. Диаметр синхротрона увеличивают в связи с необходимостью уменьшить потери на синхротронное излучение и сократить мощность высокочастотной системы.

В настоящей статье мы хотели бы указать на возможность создания таких ускорительных систем, которые позволяют получать на данном ЛУ



Принципиальная схема возвратного линотрона, 0 – инжекционный тракт, 1, 2, 3, 4 – магнитные каналы

энергию, в несколько раз большую той, на которую он номинально рассчитан. Возможность реализации таких систем, которые для краткости можно назвать линотронами, основана на особенностях динамики частиц в ЛУ, представляющем собой диафрагмированный волновод. В случае релятивистских частиц, резонансная ускоряющая волна распространяется в волноводе с постоянной скоростью, равной скорости света, и структура ЛУ по всей длине неизменна. Это приводит к двум важным свойствам релятивистского ЛУ, на которые до сих пор не обращалось должного внимания: во-первых, можно одновременно ускорять частицы, имеющие самые различные релятивистские энергии (ахроматизм ЛУ); во-вторых, можно ускорять частицы в обоих направлениях как поочередно, так и одновременно (симметрия ЛУ). Для симметричного режима должна возбуждаться стоячая волна, представляющая собой сумму волн, бегущих в противоположных направлениях.

Свойства ахроматизма и симметрии позволяют расширить использование ЛУ в различных вариантах, из которых мы рассмотрим здесь один – возвратный линотрон. Пусть на концах ЛУ установлено некоторое количество магнитных каналов, которые в общем случае должны состоять из поворотного-фокусирующих магнитов с постоянными во времени полями и магнитных линз. После k – того прохождения ЛУ сгусток частиц с энергией E_k совершает оборот в очередном магнитном канале и снова входит в ЛУ в противоположном направлении (см. рисунок). Длина пути в канале s_k должна быть кратна λ – длине волны генератора, питающего ЛУ, т.е. $s_k = q_k \lambda$ (q_k – целое). В ЛУ в обоих направлениях будут двигаться сгустки частиц с кратными энергиями E_1, E_2, \dots . Частицы с макси-

мальной энергией $E_M = k_M E_L$, где E_L — номинальная энергия ЛУ, испытывающее последнее ускорение в ЛУ, проходят мимо всех каналов и выходят наружу. Пусть, например, имеется ЛУ со стоячей волной на энергию $E_L = 350 \text{ МэВ}$, а необходимо получить $E_M = 1 \text{ ГэВ}$, т.е. утроить энергию электронов. В этом случае к имеющемуся ЛУ нужно добавить два кольцевых магнита с радиусами соответственно $R_1 = 1 \text{ м}$, $R_2 = 2 \text{ м}$, если принять умеренное значение напряженности магнитного поля $H = 10 \text{ кэ}$. Эти магниты невелики по сравнению с самим ЛУ, длина которого L составляет $L \approx 50 \text{ м}$ и представляют собой установки такого масштаба, которые предназначены для обслуживания экспериментальных работ на ЛУ (спектрометры, анализаторы и т.д.).

Ясно, что при ускорении до заданной энергии длина и масштаб системы питания могут быть существенно уменьшены в линотроне по сравнению с ЛУ, рассчитанным на ту же энергию. При этом линотрон сохраняет решающее преимущество ЛУ в смысле интенсивности, а также простоты ввода и вывода частиц. Важно также, что синхротронное излучение электронов в линотроне не будет играть существенной роли, как в синхротронах, так как число проходов магнитного поля ограничено, а выигрыш энергии в ЛУ велик. По этой же причине можно применять сильные магнитные поля и тем самым сократить размеры каналов.

При каждом прохождении ЛУ кратность q_k испытывает значительный скачок, поэтому более адекватным при описании фазового движения в линотроне оказывается аппарат конечных разностей. Это сближает его в некоторых отношениях с микротроном и позволяет воспользоваться результатами теории, развитой в свое время автором [1]. При некоторых упрощающих предположениях условие фазовой устойчивости может быть записано в виде

$$0 < \text{tg} \phi_s < \text{tg}(\phi_s)_{\text{пред}} = \frac{2}{\pi h_k}, \quad h_k = \frac{2(\pi + 1) E \cos \phi_s L}{\lambda H_k} \geq 1, \quad (1)$$

где ϕ_s — равновесная фаза, E — амплитуда электрического поля волны в ЛУ.

Условие устойчивости вертикальных бетатронных колебаний в простейшем случае имеет вид

$$-2 < \left(1 + \frac{1}{\eta_k}\right) \cos 2\pi \nu_k - 2\pi L \frac{\nu_k}{s_k} \left(\frac{1}{\eta_k} - 1\right) \sin 2\pi \nu_k < 2, \quad (2)$$

где $\nu_k/2$ — число колебаний в данном канале, $\eta_k = E_k / E_{k-1}$. Для ориентировки в вопросе об устойчивости радиальных бетатронных колебаний может служить условие, аналогичное (2), но вообще говоря, эти колебания нужно рассматривать совместно с фазовыми [1]. Условие (1) и (2) позволяют судить о допусках, которые сильно зависят от числа ускорений k_M и требований к монохроматичности пучка. Основные требования, которые вытекают из принципа линотрона и требований устойчивости — это хо-

рошая стабилизация параметров во времени и группировка (бунчирс
пучка при инъекции.

Поступило в редакцию
26 января 1967 г.

Литература

[1] А.А.Коломенский. ЖТФ, 30, 1347, 1960.