

10

ВОЗМОЖНЫЙ ВАРИАНТ ЭЛЕКТРОННОГО УСКОРИТЕЛЯ С ПОСТОЯННЫМ ВЕДУЩИМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ И С ПЕРЕМЕННЫМ ПОЛЕМ ЗАМКНУТОГО МАГНИТНОГО СЕРДЕЧНИКА

Ю. Г. Басаргин

Рассматривается возможность поэтапного ускорения электронов в кольцевой магнитной структуре с постоянным полем, когда рост энергии обеспечивается вихревым электрическим полем в течение нескольких циклов перемагничивания центрального сердечника, причем эффект замедления компенсируется включением высокочастотного поля. В качестве примера приведены параметры ускорителя на энергию 9—100 МэВ.

Введение

Идея индукционного ускорения электронов в стационарном магнитном поле была высказана в начале двадцатых годов (см. исторический обзор [1]). Спустя три десятилетия получено экспериментальное подтверждение [2], а впоследствии опубликованы конкретные предложения (например, [3]) индукционных ускорителей с кольцевой магнитной структурой секторного типа. В таких ускорителях время инжекции на несколько порядков дольше, чем в классических бетатронах, что должно соответственно повысить среднюю интенсивность. Достижимая энергия ограничивается допустимой величиной площади сечения центрального магнитного сердечника (а также влиянием синхротронного излучения).

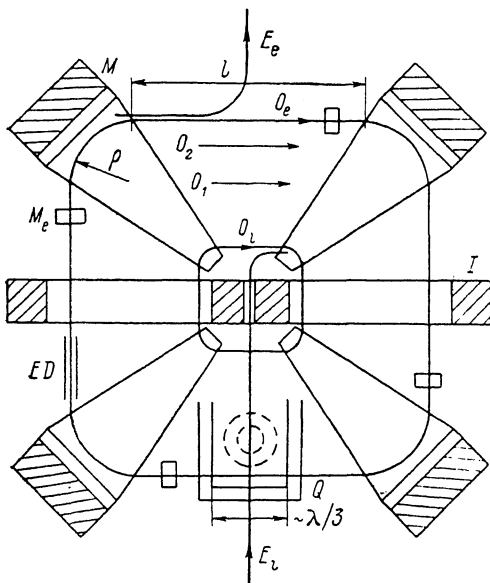
Указанное ограничение может быть значительно ослаблено, если найден способ компенсации замедления частиц на соответствующих отрезках цикла перемагничивания сердечника. В обсуждаемом варианте предполагается включение высокочастотного электрического поля, находящегося в резонансе с частотой обращения частиц по двум стационарным промежуточным орбитам. Тогда ускорение электронов в кольцевой структуре от радиуса инжекции до конечного радиуса идет в течение трех циклов изменения магнитного потока, что при том же сечении сердечника дает соответствующее умножение достижимой энергии по сравнению со схемами [2, 3]. Предполагаемый механизм является практическим развитием предложения [4] о возможности ускорения с сочетанием воздействия вихревого и высокочастотного электрических полей.

В конкретно рассмотренной схеме мультитрона (циклического ускорителя с умножением эффекта ускорения вихревым полем) электроны в четырехсекторной магнитной структуре ускоряются от 9 до 100 МэВ. Сечение центрального сердечника 0.25 м^2 , ВЧ система работает на постоянной частоте около 130 МГц. Предполагается высокоэффективный вывод, осуществляемый с орбиты у границы устойчивости горизонтального движения. В качестве инжектора может быть взят чисто индукционный кольцевой ускоритель на 9 МэВ с внешней инжекцией электронов энергии 0.4 МэВ (например, от импульсного трансформатора).

Реальной является возможность ускорения в мультитроне электронов до 100 МэВ при среднем токе 1 мА, когда перемагничивание сердечника ведется с частотой 100 Гц. Ускоренный пучок может быть использован в прикладных и технологических целях [5, 6].

1. Схема мультитрона

Магниты M (см. рисунок) образуют четырехсекторную кольцевую структуру стационарного ведущего поля. Вихревое электрическое поле возбуждается переменным магнитным потоком в индукторе I с замкнутым центральным сердечником. Электроны энергии E_e инжектируются на начальную орбиту O_1 ; около орбит O_1 и O_2 частицы удерживаются благодаря тому, что включается резонатор Q . В конце ускорения электроны энергии E_e отклоняются с орбиты O_2 электростатическим дефлектором ED ; M_e — магниты, возмущающие поле в зоне вывода.



Компоновочная схема.

В пределах элемента периодичности отрезки орбит состоят из прямолинейных участков длины l и дуг окружности радиуса ρ , средний радиус орбиты равен

$$R = \rho(1 + \chi), \quad \chi = \frac{2l}{\pi\rho}. \quad (1)$$

Среднее поле \bar{B} вдоль орбиты растет по закону

$$\bar{B} = B_i \left(\frac{R}{R_i} \right)^k, \quad k = \frac{R}{\bar{B}} \frac{d\bar{B}}{dR}. \quad (2)$$

Коэффициент χ определяет силу вертикальной фокусировки у краев магнитов M ; если поле \bar{B} линейно растет с радиусом ($k=1$), то вертикальная устойчивость обеспечивается при $\chi=2.3$ (с учетом радиального спада магнитного поля в зоне вывода). Формирование требуемой радиальной зависимости поля \bar{B} целесообразно выполнить размещением на параллельных поверхностях полюсов магнитов M токовых витков, связанных с обмоткой возбуждения.

Показанный на рисунке ВЧ элемент с двумя ускоряющими зазорами с точки зрения радиотехники представляет емкость, укорачивающую вертикальный полуволновой коаксиальный резонатор Q .

2. Соотношения между параметрами мультитрона

Основой принципа мультитрона является резонансное воздействие ВЧ поля постоянной частоты на электроны, вращающиеся около двух неподвижных промежуточных орбит O_1 и O_2 . В случае ультрарелятивистских электронов резонансное условие будет выполнено, если периметры этих орбит равны целому числу длин волн ВЧ колебаний. Например, если периметры O_2 и O_1 относятся как четыре к трем, то резонансность будет иметь место, когда длина волны равна разности периметров этих орбит, причем для орбиты O_1 резонанс будет кратности $h_1=3$, а для O_2 — кратности $h_2=4$.

После выключения ВЧ поля пучок перемещается с O_1 к O_2 в результате ускорения вихревым полем, напряженность которого равна

$$e = \frac{1}{2\pi R c} \frac{d\Phi}{dt}, \quad (3)$$

где R — определенный в (1) средний радиус, $\Phi(t)$ — переменный во времени t магнитный поток через центральный сердечник, c — скорость света.

Скорость изменения импульса $dp/dt = eE = (e/2\pi Rc)(d\Phi/dt)$. Поскольку $p = (e/c)BR$, то получается дифференциальная зависимость

$$d(BR) = \frac{d\Phi}{2\pi R}. \quad (4)$$

Интегрирование ведется с учетом (2) в пределах роста потока от $-\Phi_m$ до $+\Phi_m$. Требуемая амплитуда магнитного потока для перевода пучка от R_1 к R_2 определяется после интегрирования. Амплитуда равна (без учета синхротронного излучения)

$$\Phi_m = \frac{\pi(1+k)\bar{B}(R_1)R_1^2}{k+2} \left[\left(\frac{R_2}{R_1} \right)^{k+2} - 1 \right]. \quad (5)$$

Если индукция меняется в пределах $\pm B_m$, то площадь сечения центрального сердечника должна быть

$$S \geq \frac{\pi(k+1)}{k+2} \left[\left(\frac{R_2}{R_1} \right)^{k+2} - 1 \right] \frac{\bar{B}(R_1)R_1^2}{B_m}. \quad (6)$$

Если принять, как это сделано конкретно в рассмотренном варианте, значения $k=1$ и $R_2:R_1=4:3$, то

$$\Phi_m = \frac{74\pi}{81} \bar{B}(R_1)R_1^2. \quad (7)$$

От радиуса инжекции R_i до R_1 и от R_2 до радиуса вывода R_e частицы ускоряются за меньший промежуток времени, чем от R_1 до R_2 , что обусловлено требованием достаточного положительного прироста энергии за оборот при вводе и выводе. Пусть время ускорения до R_1 и после R_2 соответствует возрастанию потока от значения $-(\Phi_m/3)$ до $+\Phi_m$. Тогда справедлива зависимость

$$\Phi_m = \pi B(R_i)R_i^2 \left[\left(\frac{R_1}{R_i} \right)^3 - 1 \right] = \pi B(R_2)R_2^2 \left[\left(\frac{R_e}{R_2} \right)^3 - 1 \right]. \quad (8)$$

С учетом (7) из (8) выводятся формулы

$$R_1 = 3R_i \sqrt[3]{\frac{3}{7}}, \quad R_2 = 4R_i \sqrt[3]{\frac{3}{7}}, \quad R_e = 2R_i \sqrt[3]{\frac{133}{28}}. \quad (9)$$

Длина волны возбуждения ВЧ системы определяется формулой

$$\lambda = 2\pi R_i \sqrt[3]{\frac{3}{7}}. \quad (10)$$

Определяющая энергию инжекции величина $B_i R_i$ и среднее поле \bar{B}_i на радиусе R_i инжекции равны

$$B_i R_i = \frac{7\Phi_m}{74\pi R_i^2}, \quad \bar{B}_i = \frac{7\Phi_m}{74\pi R_i^2}. \quad (11)$$

На радиусе R

$$B(R)R = \left(\frac{R}{R_i} \right)^2 B_i R_i, \quad B(R) = B_i \frac{R}{R_i}. \quad (12)$$

Для ультрарелятивистских электронов энергия E (МэВ) = 300 \bar{B} (Тл) R (м). В конце ускорения радиус и энергия равны

$$R_e = 3.36 R_i, \\ E \text{ (МэВ)} = \frac{4.2 \cdot 10^8}{37\pi} \left(\frac{133}{28} \right)^{2/3} \frac{\Phi_m \text{ (Тл} \cdot \text{м}^2)}{R_i \text{ (м)}} \approx \frac{101 \Phi_m \text{ (Тл} \cdot \text{м}^2)}{R_i \text{ (м)}}. \quad (13)$$

Таким образом, если поток центрального сердечника синусоидально меняется со временем, то в полупериоды роста потока имеет место индукционное ускорение трех групп частиц в зонах радиусов: $R_i - R_1$, $R_1 - R_2$ и $R_2 - R_e$. В полупериоды спада потока включено ВЧ поле, которое удерживает две группы частиц около орбит с радиусами R_1 и R_2 . К радиусу вывода R_e электроны поступают с частотой изменения потока.

3. Требования к ВЧ системе

Инжекция электронов ведется в течение отрезка Δt_i периода перемагничивания T . Ускоренный до R_1 пучок имеет энергетический разброс, примерно равный $\Delta E_i/E_i = \pm(\pi/2)(\Delta t_i/T)$. Если eV_0 — амплитудное изменение энергии электронов при пролете ускоряющего элемента, то при включении резонатора Q относительный размах сепаратрисы будет $(\Delta E/E_1)_s = \sqrt{2eV_0(k+1)}/\pi h_1 E_i$. Пучок будет захвачен в сепаратрису, когда $(\Delta E/E_1)_s > 2\Delta E_i/E_1$. Получается условие для амплитуды (при $k=1$) в зависимости от длительности инжекции

$$eV_0 > \frac{\pi^3 h_1 E_1}{4} \left(\frac{\Delta t_i}{T} \right)^2. \quad (14)$$

Условие (14) обеспечивает захват и на радиусе R_2 . Переходные процессы при включении и выключении резонатора должны по времени соответствовать нескольким периодам синхротронных колебаний. В реальных условиях eV_0 на два порядка превосходит замедляющее действие вихревого поля, поэтому практически в установившемся режиме сепаратриса соответствует равновесной фазе 180° .

4. Влияние синхротронного излучения

Выведенные выше зависимости не учитывают радиационное торможение электронов в магнитном поле, но они тем точнее, чем меньше период T циклов перемагничивания сердечника. Средний за полупериод прирост энергии за оборот от вихревого поля равен

$$\delta E_\Phi \text{ (эВ)} = \frac{4\Phi_m (\text{Тл} \cdot \text{м}^2)}{T \text{ (с)}}.$$

Однако на синхротронное излучение за оборот теряется энергия

$$\delta E_\gamma \text{ (эВ)} = 88.5 \cdot 10^3 \frac{E^4 \text{ (ГэВ)}}{\rho \text{ (м)}}.$$

Влиянием излучения можно пренебречь, если при энергии E_s радиационное торможение на порядок слабее индукционного ускорения. Для конкретного рассматриваемого варианта ($E_s=100$ МэВ, $\rho_s=0.5$ м, $\Phi_m=0.5$ Тл·м²) это условие выполняется, если перемагничивание ведется с частотой 100 Гц.

5. Ускорение интенсивного пучка

В мультитроне благодаря сравнительно длительному времени инжекции может быть получен ускоренный электронный пучок высокой средней интенсивности (порядка 1 мА), которой соответствует средняя мощность около 100 кВт. Мощность передается пучку от двух источников: источника, питающего обмотку возбуждения индуктора I , и от ВЧ генератора, возбуждающего резонатор Q . Мощность между этими двумя источниками делится примерно поровну. ВЧ генератор работает со скважностью 2, его установленная мощность должна быть равна средней мощности пучка плюс тепловые потери в резонаторе.

6. Вывод и ввод

С помощью магнитов M_s (см. рисунок) в окрестности орбиты O_s формируется крутой радиальный спад среднего поля B . Ускоряемые вихревым полем частицы перемещаются к границе устойчивости горизонтального движения — радиусу, где $k=-1$. При подходе к этому радиусу по прогрессии возрастает разделение последовательных орбит, так что электроны с высокой эффективностью забрасываются в электростатический дефлектор ED с тонким септумом. Пучок, отклоненный с радиуса, где $k=-1$, имеет весьма малую неоднородность энергии [7].

В основной зоне ускорения частота горизонтальных поперечных колебаний частиц около мгновенных орбит $\nu_x \approx 1.45$, частота вертикальных колебаний $\nu_z \approx 1.15$, в зоне вывода $\nu_x \rightarrow 0$, $\nu_z \rightarrow 1.8$. Устойчивость вертикального движения в зоне вывода сохраняется.

Механизм ввода предполагается аналогичным; условие $k \approx -1$ около орбиты O ; формируется токовыми витками на полюсах основных магнитов M .

7. Численный пример

Конкретно рассмотрены параметры ускорителя на энергию электронов 100 МэВ с энергией инжекции 9 МэВ. Радиусы орбит меняются от $R_i = 0.5$ м до $R_e = 1.68$ м, соответствующие радиусы кривизны в поле магнитов M заключены в пределах $0.15 < \rho < 0.51$ м. Среднее поле B возрастает от 0.06 Тл при инжекции до 0.2 Тл в зоне вывода; в магнитах M поле меняется в пределах 0.2—0.67 Тл.

Амплитуда изменения потока в индукторе I с частотой 100 Гц составляет $\Delta\Phi_m = 0.5$ Тл·м², что соответствует площади сечения центрального сердечника $S = 0.25$ м² и амплитуде поля $B_m = 2$ Тл.

На промежуточных орбитах O_1 и O_2 удерживаются электроны с энергиями около 45 и 80 МэВ. Этим орбитам соответствуют радиусы $R_1 = 1.13$ м и $R_2 = 1.51$ м. Длина волны ВЧ колебаний, возбуждающих резонатор Q , приблизительно равна $\lambda = 2.3$ м.

Предполагается инжекция длительности 50 мкс с частотой повторения 100 Гц. У радиуса R_1 после индукционного ускорения относительная энергетическая неоднородность пучка лежит в пределах $\pm 10^{-2}$. Для удержания частиц около радиусов R_1 и R_2 амплитуда напряжения на ВЧ элементе длины $\lambda/3$ приблизительно равна 25 кВ. Инжекция электронов энергии 9 МэВ может быть осуществлена от чисто индукционного (без ВЧ системы) ускорителя, структура которого является вдвое уменьшенной копией основного ускорителя. Внешняя инжекция электронов энергии 0.4 МэВ в малый ускоритель предполагается от импульсного трансформатора, который должен обеспечивать ток электронов около 0.5 А в импульсе (100 Гц, 50 мкс).

Заключение

Мультиотрон по достижимой энергии примерно соответствует возможностям классического бетатрона, однако он может обеспечить во много раз более высокую интенсивность как внутреннего, так и внешнего пучка. Интенсивность будет ограничиваться потерями при выводе. Отработка механизма вывода может быть проведена на инжекторе — индукционном ускорителе с постоянным магнитным полем на энергию 9 МэВ.

Требования к допускам не являются критическими, предполагаемый ускоритель должен быть простым в эксплуатации. Однако, учитывая габаритные параметры магнитной системы, обсуждение применения мультиотрона целесообразно лишь при действительной потребности в высокой интенсивности пучка.

Автор выражает признательность А. А. Коломенскому за критику первоначального варианта данного текста и В. П. Белову за полезные обсуждения.

Литература

- [1] Гринберг А. П. // УФН. 1975. Т. 117. № 2. С. 333—346.
- [2] Terwilliger K. M. // Rev. Sci. Instr. 1956. Vol. 27. P. 651—664.
- [3] Казанский Л. Н., Канунников В. Н., Коломенский А. А. и др. // Тр. Всесоюз. совещания по ускорителям заряженных частиц. М., 1970. Т. 2. С. 351—353.
- [4] Row E. M., Hiden R. H. // Bull. Amer. Phys. Soc. 1964. Vol. 9. P. 474—475.
- [5] Глухих В. А. // Атомная энергия. 1979. Т. 47. С. 225—230.
- [6] Вахрушин Ю. П., Глухих В. А., Свиньин М. П. // Тр. IX Всесоюз. совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1986. Т. 2. С. 75—82.
- [7] Басаргин Ю. Г., Литвиновский Р. Н. // ДАН СССР. 1969. Т. 186. № 2. С. 1288—1289.

Поступило в Редакцию
12 июня 1987 г.

В окончательной редакции
17 января 1989 г.