

О НЕСТАБИЛЬНОСТИ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА БЕТАТРОНА

В. М. АНТОНОВ, В. В. ЕВСТИГНЕЕВ, Б. А. КОНОНОВ

(Представлена объединенным семинаром НИИ ЯФ и ФТФ ТПИ по спектрометрии)

Введение

Бетатрон с выведенным электронным пучком является источником моноэнергетических электронов высокой энергии и применяется для изучения взаимодействия электронов с веществом.

Для получения количественных результатов при этом чрезвычайно важными характеристиками являются стабильность энергии и малая полуширина энергетического распределения электронов в пучке.

Однако, как показано нами [1], [2], ввиду ряда факторов энергетический спектр электронного пучка нестабилизированного бетатрона имеет полуширину около 2%. Исследование энергетического спектра электронного пучка бетатрона и его стабильности дает возможность получить рекомендации по изготовлению высокостабильных бетатронов и установить оптимальные режимы его работы.

Исследуется нестабильность бетатрона на 10 Мэв конструкции Томского политехнического института, вывод электронного пучка в котором осуществлен электростатическим методом.

В конце ускорительного цикла электроны смещаются обмоткой, усиливающей поток в центральном сердечнике полюса бетатрона до границы нестабильности, т. е. окружности, где электроны выходят из области действия фокусирующих сил магнитного поля. Резко возрастает амплитуда бетатронных колебаний электронов, шаг их спиральной траектории становится достаточной для обхода лобовой поверхности внутренней пластины отклоняющего конденсатора. Электроны, пройдя отклоняющее поле, освобождаются от действия управляющего магнитного поля и выходят из ускорительной камеры.

Импульс сброса имеет передний фронт несколько меньший, чем 1 мсек, но это не оказывает мгновенного воздействия на пучок. С помощью сцинтилляционного счетчика и осциллографа СИ-1 измерено, что наибольшее время сброса составляет 16 мсек [4]. Следовательно, время смещения и вывода электронов имеет конечную величину. Это означает, что некоторые электроны испускаются с номинальной энергией, а другие задерживаются и в связи с этим подвергаются дополнительному ускорению, приобретая дополнительную энергию.

Отсюда можно сделать вывод, что основной энергетический разброс обусловлен бетатронными колебаниями, конечным временем сброса, нестабильностью питающего напряжения и влиянием отклоняющего конденсатора.

Зависимость базисной ширины энергетического спектра от бетатронных колебаний

Анализ радиального движения электронов показывает, что движение можно описать синусоидальной волной с амплитудой затухающей как

$$\frac{1}{\sqrt[4]{1-n}} \cdot \frac{1}{\sqrt{B}}, \quad (1)$$

где n — показатель спада магнитного поля,

B — соответствующая индукция на радиусе равновесной орбиты. Затухание амплитуды бетатронных колебаний приводит к уменьшению энергетического разброса ускоренных электронов.

Плотность ускоряющего магнитного потока

$$\Phi = \Phi_m \cdot \sin \omega t. \quad (2)$$

При определенной величине магнитного потока срабатывает цепь смещения и электроны выпускаются, обладая определенным импульсом

$$B\rho = \kappa\Phi. \quad (3)$$

Энергетическое распределение может быть представлено соотношением

$$\varepsilon = \frac{\Delta\Phi}{\Phi} = \frac{\Delta B\rho}{B\rho}; \quad (4)$$

или

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{B_x \rho_x - B_0 \rho_0}{B_0 \rho_0} = \left(1 + \frac{x}{\rho}\right)^{1-n} - 1, \quad (5)$$

где x — амплитуда бетатронных колебаний при заданной энергии электронов,

ρ — радиус равновесной орбиты.

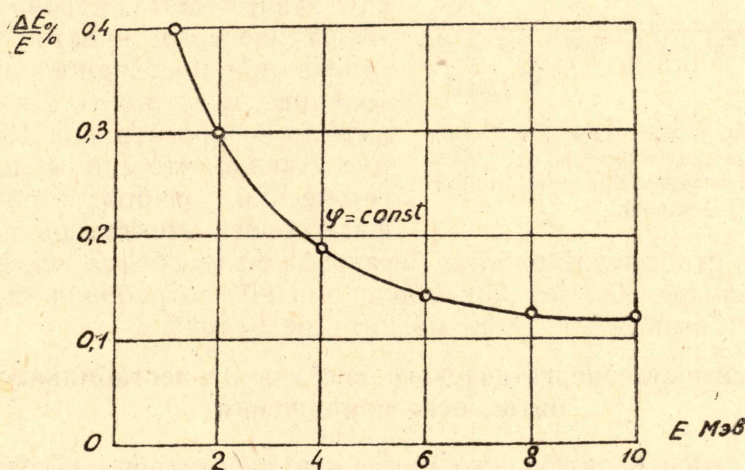


Рис. 1. Зависимость базисной ширины энергетического спектра от энергии ускоренных электронов (фаза сброса равна 75°).

На рис. 1 представлена расчетная зависимость базисной ширины энергетического спектра от энергии ускоренных электронов при постоянной фазе сброса равной $\alpha_p = 75^\circ$. Изменение энергии достигается

регулировкой напряжения на магните бетатрона. Начальная амплитуда, соответствующая расстоянию инжектора от равновесной орбиты, равна 2,8 см. Из рис. 1 видно, что минимальный энергетический разброс электронов соответствует максимальной энергии ускоренных электронов.

Зависимость базисной ширины энергетического спектра от конечного времени сброса

Связь между приростом энергии и изменением потока в бетатроне выражается соотношением

$$\Delta\Phi = \kappa\Delta E. \quad (6)$$

Следовательно, каждому значению прироста ΔE в бетатроне должно соответствовать определенное изменение потока внутри орбиты. Так как

нарастание магнитного потока происходит по синусоидальному закону [2], то одному и тому же времени сброса при разных фазах будет соответствовать различное изменение потока и, следовательно, различный прирост энергии. Прирост дополнительной энергии уменьшается с увеличением фазы сброса электронов с равновесной орбиты. Это дается следующим соотношением, полученным в работе [3]:

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{2\pi \cdot \Delta\tau}{T} \cdot \text{ctg } \varphi, \quad (7)$$

где $\Delta\tau$ — длительность импульса,
 T — период φ -фазы сброса.

На рис. 2 представлена расчетная зависимость базисной ширины энергетического спектра от фазы сброса при постоянной энергии ускоренных электронов. Длительность импульса сброса равна 16 мсек. Из рис. 2 видно, что минимальный энергетический разброс соответствует фазе сброса электронов равной 90° .

Однако для стабильной работы бетатрона фазу сброса всегда делают несколько меньше 90° , так как сброс при 90° потребовал бы хорошей стабилизации амплитуды тока магнита бетатрона [3].

Зависимость энергетического спектра от нестабильности питающего напряжения

Нестабильность питающего напряжения бетатрона вызывается изменением напряжения или частоты питающей сети.

1. Изменение напряжения приводит к изменению энергии ускоренных электронов, если фаза сброса постоянная. Чтобы избавиться от этого, бетатроны снабжаются схемами стабилизации, которые обеспечивают заданный уровень энергии путем автоматической подстройки фазы сброса электронов. Напряжение на магните бетатрона выражается

$$U = U_0 \sin \varphi, \quad (7)$$

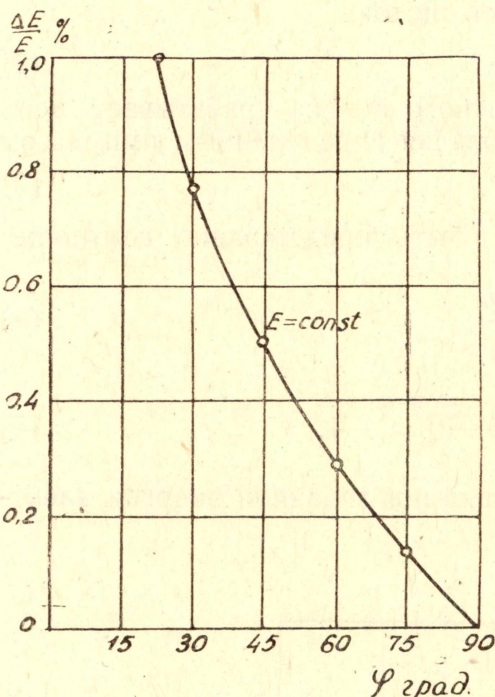


Рис. 2. Зависимость базисной ширины спектра электронов от фазы смещения электронов при постоянной энергии.

где U — заданный уровень напряжения,
 U_0 — амплитудное значение напряжения.
 Отсюда

$$\varphi = \arcsin \frac{U}{U_0}. \quad (8)$$

Подставляя (8) в (6), получим

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{2\pi}{T} \Delta\tau \operatorname{ctg} \arcsin \frac{U}{U_0}. \quad (9)$$

Следовательно, изменение питающего напряжения приводит к изменению энергетического спектра электронов при постоянной энергии.

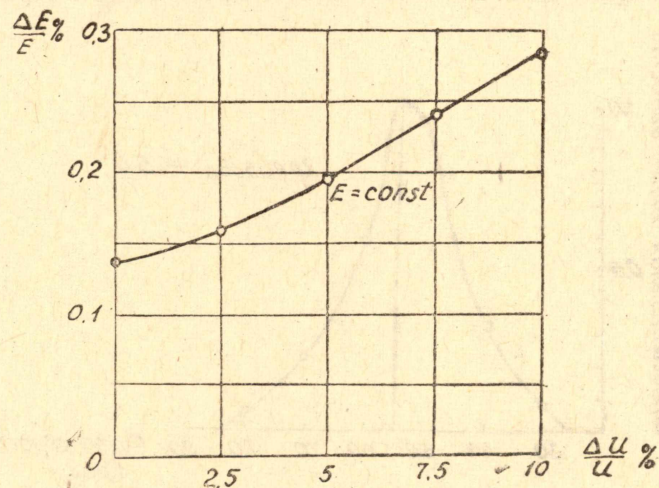


Рис. 3. Зависимость базисной ширины спектра электронов от нестабильности питающего напряжения ($E = \text{const}$, $\varphi = 75^\circ$).

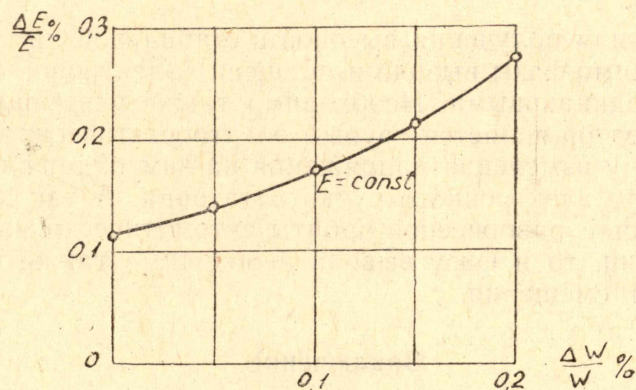


Рис. 4. Зависимость базисной ширины спектра электронов от нестабильности частоты питающего напряжения ($E = \text{const}$, $\varphi = 75^\circ$).

На рис. 3 показана расчетная зависимость базисной ширины энергетического спектра бетатрона от нестабильности питающего напряжения. Из рисунка видно, что нестабильность питающего напряжения 10% вызывает изменение базисной ширины спектра электронов в 2 раза.

2. Изменение частоты питающей сети приводит к расстройке резонансного контура силового питания бетатрона, что ведет к резкому изменению тока вторичной обмотки бетатрона. Поэтому для устойчивого

уровня стабилизации энергии фазу сброса необходимо уменьшать, что соответственно увеличивает ширину энергетического разброса. На рис. 4 показана расчетная зависимость базисной ширины энергетического спектра электронного пучка от нестабильности частоты питающего напряжения бетатрона.

Влияние дефлектора на электронный пучок бетатрона

Отклоняющий конденсатор для вывода электронов питается импульсным напряжением пикового трансформатора [4].

Произведено экспериментальное исследование зависимости интенсивности выведенного электронного пучка относительно фазы смещения при постоянной фазе вывода. Результаты приведены на рис. 5. Рисунок

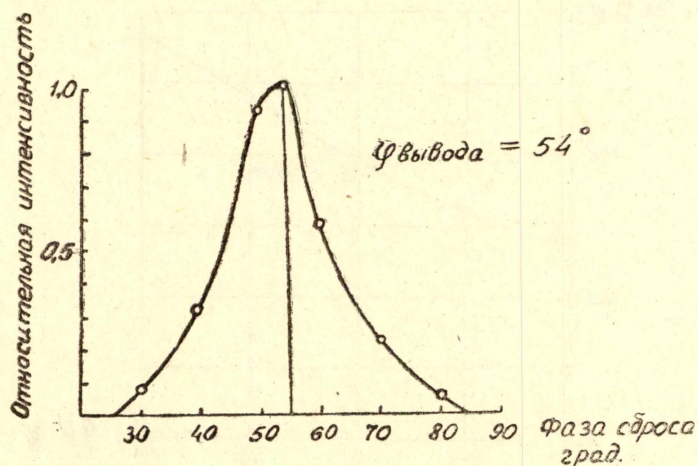


Рис. 5. Зависимость интенсивности электронного пучка бетатрона от фазы смещения при постоянной фазе вывода электронов.

показывает, что для получения высокой и стабильной интенсивности излучения необходимо фазы вывода и смещения электронов с равновесной орбиты делать одинаковыми. Необходимо также учитывать, что отклоняющий конденсатор является грубым электростатическим бетаспектрометром и поэтому изменение напряжения на нем будет влиять на энергетический спектр электронного пучка бетатрона. А так как фаза смещения электронов с равновесной орбиты автоматически изменяется схемой стабилизации, то и фазу вывода необходимо также изменять синхронно с фазой смещения.

Заключение

Таким образом, показано, что базисная ширина энергетического спектра стабилизированного бетатрона составляет десятые доли процента.

Произведенные расчеты доказывают, что с точки зрения энергетического спектра изменение энергии электронного пучка бетатрона лучше всего производить путем изменения напряжения на магните бетатрона, оставляя фазу сброса постоянной. Сброс электронов лучше всего производить при фазе несколько меньшей 90° , чтобы избавиться от громоздких схем жесткой стабилизации пика амплитуды тока в магните бетатрона. Схемы, обеспечивающие стабилизацию энергии электронов путем автоматической подстройки фазы смещения их с равновесной ор-

биты, нарушают в то же время энергетический спектр электронного пучка бетатрона в пределах десятых долей процента.

Для жесткой стабилизации энергии электронов выведенных из бетатрона фазы выходы и смещения электронов с равновесной орбиты должны быть автоматически связаны.

ЛИТЕРАТУРА

1. Б. А. Кононов, В. М. Антонов, В. В. Евстигнеев. Исследование энергетического спектра электронного пучка бетатрона на 7, 5 Мэв. Изв. АН СССР, сер. физика, № 2, 1964.

2. Б. А. Кононов, В. М. Антонов, Ю. Н. Бельтяев. Изучение спектра электронов, выведенных из бетатрона. Сборник трудов конференции по электронным ускорителям, 1962.

3. T. Westermarck, Nuclear Instruments and Methods. 10, 129, 1961.

4. Б. А. Кононов. Вывод электронов из бетатрона электростатическим способом. Изв. ТПИ, том 94, 1958.