

## МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ ПОЛЯ И ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГИИ В КОЛЬЦЕВОМ ФАЗОТРОНЕ

В.Н. Канунников, А.А. Коломенский, В.А. Пападичев

На электронном ускорителе - кольцевом фазотроне (КФ)<sup>1</sup> проведена реконструкция, позволившая поднять энергию электронов в четыре раза, а также заметно улучшить другие параметры. Устойчивое ускорение до крайне релятивистских энергий ( $\gamma \approx 100$ ) при постоянстве магнитного поля во времени обеспечивается в КФ за счёт двух факторов. Во-первых, поле резко нарастает с радиусом по степенному закону  $H \sim r^n$  примерно в 100 раз ( $n = 16,0$ ). Во-вторых, знаки поля в соседних секторах (всего их 40) чередуются, чем достигается необходимая сильная фокусировка. Особенность заключается в том, что при ширине магнитной дорожки  $\approx 40$  см основное возрастание энергии происходит в области максимального поля, на последних сантиметрах. Именно здесь приходится сталкиваться с наибольшими трудностями при решении сложной задачи создания требуемого магнитного поля.

В области малых и средних значений поле в кольцевом фазотроне обычно формируется с помощью распределённых обмоток, а геометрия полюсов в этой области подобна (все размеры увеличиваются с радиусом линейно). При отсутствии насыщения в железе это обеспечивает так называемое "подобное магнитное поле" вида  $H_x \sim r^n \sum_k \cos(k\theta + \varphi_k)$  и вместе с тем подобие орбит и траекторий ускоряемых частиц (см.<sup>2</sup>). При

этом частоты бетатронных колебаний  $\nu_r$  и  $\nu_z$  оказываются постоянными, не зависящими от радиуса. Это необходимо, чтобы в процессе ускорения избежать пересечения опасных резонансов.

В области больших полей нужную конфигурацию поля приходится для экономии ампервитков создавать не распределением поверхностных токов, а формой полюсов электромагнита. Требование "подобия" поля приводит здесь к необходимости рассчитать и выполнить с большой точностью полюса сложной формы (с переменной кривизной в обоих сечениях - азимутальном и радиальном). Однако на практике приходится отклоняться от расчётной формы полюсов, в частности уменьшать их протяжённость по азимуту. Это необходимо для размещения, например, ускоряющих устройств и для снижения потоков рассеяния. Последней цели служит и радиальное расположение проводников с током у полюса. При этом существующие методы расчёта (см. например<sup>3,4</sup>) становятся плохо применимыми и не позволяют оценить допускаемую ошибку.

Исходя из сказанного, для формирования поля КФ в области больших полей на радиусах  $r = 150 - 160$  см нами был принят принципиально другой метод, основанный на отказе от строго подобного магнитного поля. Заметим, что неподобное магнитное поле применяется в изохронных циклотронах, где, однако, условие изохронности приводит к тому, что частоты бетатронных колебаний зависят от радиуса. Здесь же была поставлена задача добиться постоянства  $\nu_r$ ,  $\nu_z$  в гораздо более тяжёлых условиях (большие градиенты, сильная нелинейность поля, жёсткая фокусировка и т.п.).

Численное интегрирование на ЭВМ уравнений движения подтвердило, что условие постоянства  $\nu_r$  и  $\nu_z$  предъявляет значительно менее жёсткие требования к форме магнитного поля, чем требование подобия, и что постоянства частот можно достичь многими способами. При таком подходе расширяется класс магнитных полей, пригодных для ускорения. В частности, могут быть

выбраны такие поля, при которых упрощается изготовление полюсов. В КФ вертикальный зазор между полюсами уменьшается по закону  $\sim r^n$  (при  $n = 16,0$ ), а боковые поверхности имеют плоские срезы. Для расчёта формы поля и требуемой формы полюсов был применён адекватный задаче метод конформных отображений<sup>5</sup>, который позволяет также учесть влияние витков с током, расположенных вблизи рабочей области магнита.

По расчётам были изготовлены полюсные наконечники для четырёх запасных блоков магнита КФ, измерения на этих блоках показали хорошее согласие экспериментальных и расчётных характеристик поля. Одновременно на ускорителе была разработана и апробирована методика точных измерений частот бетатронных колебаний<sup>6</sup>, что позволило связать данные расчётов и измерений магнитного поля с движением рабочей точки на диаграмме устойчивости  $\nu_x, \nu_y$ .

Кроме переделки полюсных наконечников, формирующих магнитное поле в области  $r = 150 + 160$  см, на ускорителе был проведён ряд других усовершенствований, связанных с некоторой реконструкцией установки. Во-первых, требовалось уменьшить потоки рассеяния между блоками с помощью установки новых яремных обмоток  $S$  - образной формы<sup>7</sup> и увеличить сечение ярма магнитных блоков, чтобы повысить магнитное поле. Решение этих задач позволило поднять конечную энергию пучка в 4 раза - с 10 Мэв до 40 Мэв. Во-вторых, предстояло улучшить эксплуатационные качества системы питания и ввести систему регулируемой компенсации опасных гармоник асимметрии магнитного поля в области инъекции. Это позволило оперативно изменять режим питания, производить регулировку уровня магнитного поля и энергии частиц, переходить из одной рабочей точки в другую.

Кроме того, перед запуском ускорителя был проведён полный цикл магнитных измерений на реконструированном магните и устранены искажения поля. Измерения показали, что характеристики идеального по-

ля соответствуют расчёту, а низкочастотные гармоники искажений всех трёх составляющих поля (аксиальной, радиальной, азимутальной) не превышают допусков, составляя менее 0,1% основного поля на радиусе инъекции и уменьшаясь до  $0,02 + 0,01\%$  в области больших радиусов.

После получения первого оборота и циркуляции пучок сразу был ускорен до конечного радиуса. При этом для повышения конечной энергии был совершён переход в новую рабочую точку, соответствующую отношению постоянной составляющей магнитного поля к основной (двадцатой) гармонике  $f_0 = a_0/a_{20} = 0,11$ . Для контроля характеристик магнитного поля была измерена зависимость величин  $\nu_r$  и  $\nu_z$  от радиуса. Внутри полюса частоты постоянны с хорошей точностью:  $\nu_r = 1,82 \pm 0,02$  и  $\nu_z = 5,63 \pm 0,02$ . На рис. 1 показано движение рабочей точки на диаграмме устойчивости в режиме  $f_0 = 0,11$ .

В мае 1969 года на кольцевом фазотроне ФИАН после его реконструкции был получен пучок электронов с энергией 40 Мэв и интенсивностью более  $10^{11}$  частиц в секунду при частоте повторения 50 гц. С помощью подстройки скорости изменения частоты в конце ВЧ-программы осуществлена растяжка пучка до  $2 + 3$  мсек что соответствует коэффициенту заполнения 10-15% (рис. 2).

Как показали магнитные измерения, поле на максимальном радиусе 159,5 см может быть ещё увеличено до 6 кгс, т.е. на 25%, что соответствует максимальной энергии пучка  $\sim 50$  Мэв и примерно в 2 раза превышает проектную энергию. При этом насыщения ярма ещё не происходит, и дальнейшее увеличение поля ограничивается системой питания. Поэтому возможно увеличение максимальной энергии ещё на  $10 + 15\%$  путём шиммирования полюсов у блоков с положительным направлением поля для компенсации краевого эффекта, приводящего к уменьшению  $f_0$  на конечных радиусах.

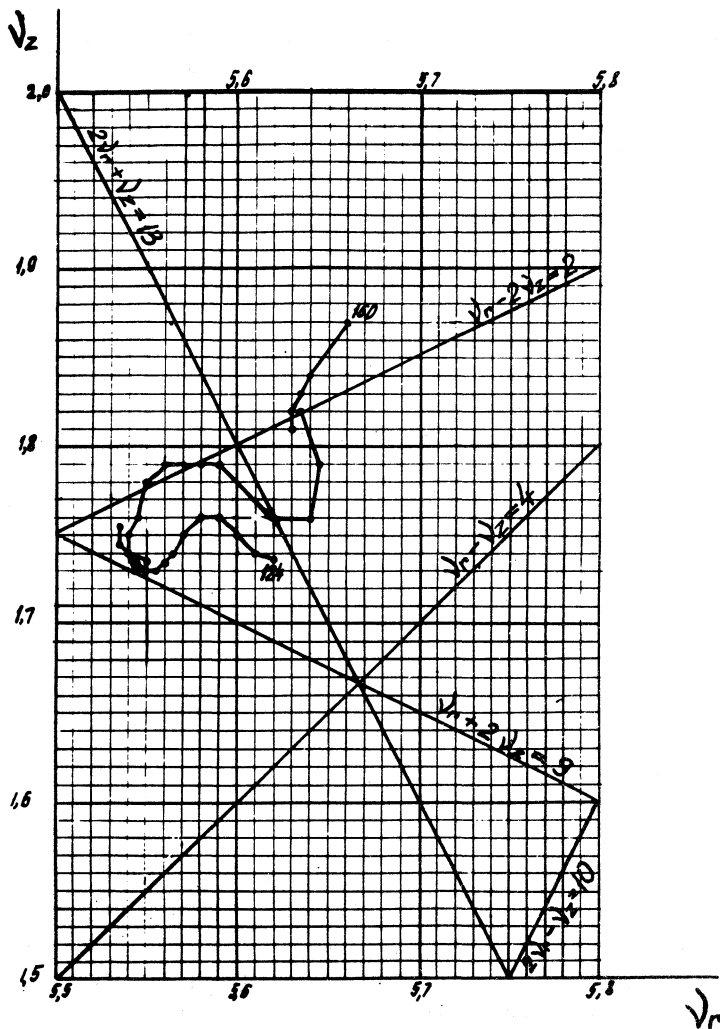


Рис. 1 Движение рабочей точки на диаграмме устойчивости  $V_r, V_z$  по измерениям в режиме  $f_s = 0,11$ . Цифры у кривой обозначают начальный (124 см) и конечный (160 см) радиусы; остальные точки нанесены через 1 см по радиусу.

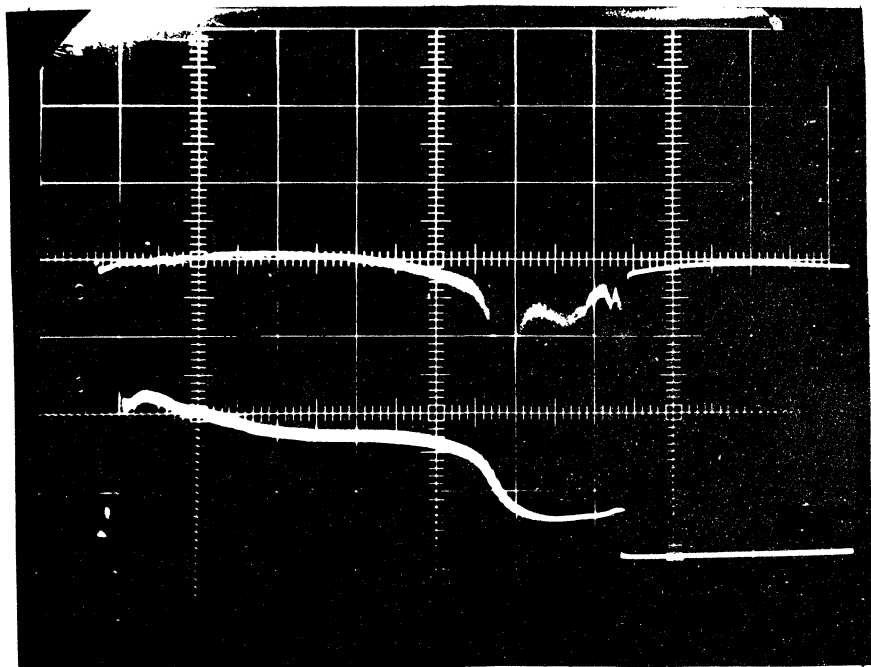


Рис. 2 Ускорение электронов до энергии  $\sim 40$  Мэв и сброс на мишень с "растяжкой" пучка. Верхний луч - сигнал со сцинтилляционного детектора, регистрирующего тормозное излучение. Нижний луч - сигнал с электростатических индукционных электродов. Масштаб по горизонтали - 1 мсек в большом делении; длительность цикла ускорения  $\sim 7$  мсек, длительность сброса пучка на мишень  $\sim 2,5$  мсек, частота повторения циклов 50 гц, интенсивность  $2 \cdot 10^9$  электронов в цикле.

По совокупности достигнутых значений параметров (энергия, интенсивность) и режимов работы (накопление пучков, растяжка, стабильность энергии) установка КФ обладает сейчас такими характеристиками, которые позволяют эффективно использовать её как для исследований в области ускорителей и накопителей, так и для постановки физических экспериментов.

Авторы выражают искреннюю благодарность Д. Д. Красильникову, В.Ф. Кавторову, Ю.С. Маштакову, Л.Н. Чекановой, Е.Г. Аверьянову и П.С. Михалёву, внёсшим большой вклад в реконструкцию установки и участвовавшим в магнитных измерениях.

Поступила в редакцию  
9 декабря 1969 г.

#### Л и т е р а т у р а

1. Канунников В. Н., Коломенский А. А., Лебедев А. Н. и др. ПТЭ № 5, 71 (1967).
2. Коломенский А. А. Атомная энергия, 3(12), 492 (1957).
3. Iliescu C.C. Nucl. Instrum. and Meth. 21, 136 (1963).
4. Heinz W., Hoffman G., Möhl D., Rasso B., Rudloff W. Vorschlag für ein FFAG-Elektronensynchrotron ( Radialsektortyp, 150 Mev ) 1966.
5. Пападичев В. А. Препринт ФИАН № 69 (1969).
6. Казанский Л. Н., Канунников В. Н., Пападичев В. А., Яблоков В. Н. Препринт ФИАН № 50 (1968).
7. Канунников В. Н. ЖТФ, 33, 592 (1963).