

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТОВ НАСЫЩЕНИЯ МАГНИТА В КОЛЬЦЕВОМ ФАЗОТРОНЕ

В. Н. Канунников, П. С. Михалев, В. А. Пападичев

Важнейшей особенностью кольцевого фазотрона является возможность получения пучков ускоренных частиц с высокой средней интенсивностью и хорошей временной структурой (см., напр., /1/). Используя индукционное ускорение, можно получать квазинепрерывные пучки электронов с энергией до ~ 150 Мэв и интенсивностью до $10^{14} - 10^{15}$ электронов/сек (см. напр., /2/). Кольцевой фазотрон не получил широкого распространения из-за ряда недостатков, одним из которых является сложность магнитной системы и жесткие допуски на искажения поля. Однако, как показал опыт работы электронного кольцевого фазотрона (КФ) ФИАН /3,4,5/ и аналогичного ускорителя в США /6/, трудности формирования и стабилизации необходимого магнитного поля вполне преодолимы. Более того, в результате исследований, выполненных на КФ ФИАН, разработан новый подход к задаче формирования поля /4,5/, который упрощает расчет и изготовление магнита.

Электронные кольцевые фазотроны имеют большие размеры магнита по сравнению с ускорителями на ту же энергию, в которых вариация магнитного поля отсутствует (синхротроны, бетатроны). Постоянство магнитного поля позволяет частично компенсировать этот недостаток увеличением напряженности магнитного поля до 15 - 18 кэ (по сравнению с 7 - 10 кэ в синхротронах и бетатронах) Однако во всех построенных и проектировавшихся до сих пор кольцевых фазотронах максимальная напряженность поля выбиралась очень низкой (4 кэ в КФ ФИАН /3/, 5 кэ в американском ускорителе /6/, 3 - 9 кэ в проектировавшемся немецком кольцевом фазотроне на 150 Мэв /7/), чтобы избежать какого-либо влияния эффектов насыщения железа на распределение поля и облегчить зада-

чу его формирования. Целью настоящей работы является выяснение степени влияния насыщения магнита на работу кольцевого фазотрона и пределов возможного увеличения максимального поля.

Уже в процессе формирования магнитного поля КФ ФИАН его напряженность на последней орбите была увеличена до 6,3 кэ, и эффектов насыщения не наблюдалось /5/. Возможность дальнейшей форсировки поля ограничена системой питания и охлаждения магнита; кроме того, при некотором уровне поля начнется насыщение ярем, не рассчитанных на значительное повышение поля по сравнению с номинальным. Для экспериментального исследования влияния эффектов насыщения было проведено моделирование поля на измерительном магнитном стенде КФ ФИАН. В качестве модели был использован период радиально-секторной магнитной системы, состоящий из трех блоков магнита КФ. Чтобы форсировать поле в несколько раз по сравнению с номинальным, один блок (установленный в середине элемента) был реконструирован: число витков главной обмотки удвоено, и применена такая система питания и охлаждения, которая позволяла увеличивать более чем в два раза и ток возбуждения. Чтобы уменьшить насыщение ярем, измерения проводились в режиме возбуждения одного среднего блока, а пересчет измеренных параметров поля к режиму реального возбуждения производился по формулам работы /8/.

Точность магнитных измерений обеспечивалась хорошей точностью изготовления блоков магнита ($\leq 0,1$ мм), прецизионной установкой блоков и измерительного датчика на стенде ($\leq 0,1$ мм), высокой стабильностью тока возбуждения ($\leq 0,03\%$) и высокой относительной точностью измерений магнитного поля ($\sim 0,1\%$). Датчиком напряженности исследуемого поля служила вращающаяся пробная катушка. Индуцируемая в ней ЭДС измерялась компенсационным методом с помощью потенциометра переменного тока, включенного по такой схеме, которая не требует стабилизации скорости вращения катушки /9/. Рабочий ток потенциометра типа Р56/2 стабилизирован с точностью лучше 0,1% и контролируется динамическим амперметром типа Д57/14, имеющим основную погрешность + 0,05%.

Измерения проводились в области сильных полей на нескольких радиусах магнитной системы (снималась зависимость поля от азимута). На периоде системы (длиной π/N радиан) измерялось 36 значений поля (через каждые $0,5^\circ$); отсчет азимутов с точ-

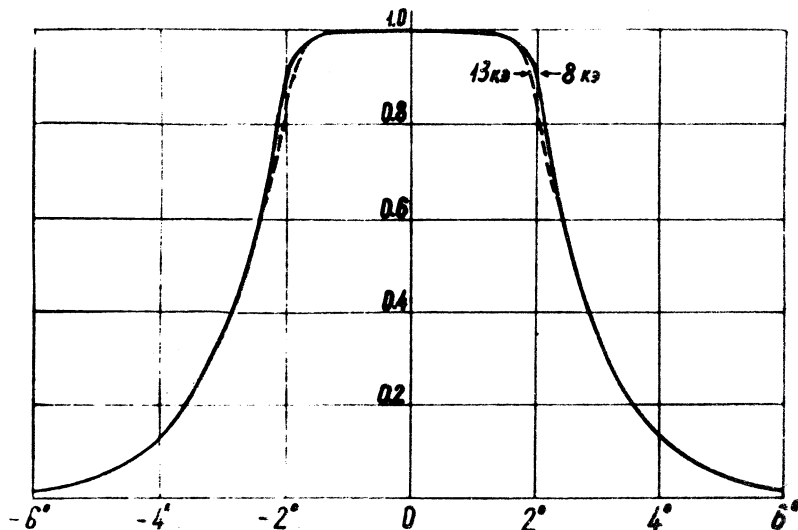
ностью лучше 0,5' проводился теодолитом типа ТТ-5. Измеренное распределение поля от азимута исследовалось методом гармонического анализа при нескольких значениях максимального поля. На рис. I показаны в качестве примера два распределения, полученные на радиусе 161 см (конец рабочей области КФ) при ~ 8 кгс и ~ 13 кгс. Таблица значений первых пяти гармоник разложения этих кривых в ряд Фурье приведена ниже.

Таблица I

Относительная амплитуда гармоник измеренного поля при двух значениях максимальной напряженности

Номер гармоники ($N = 20$)	0	N	$2N$	$3N$	$4N$	$5N$
При 8 кгс	0,639	1,000	0,448	0,044	0,123	0,134
При 13 кгс	0,637	1,000	0,454	0,052	0,115	0,130

Измерения показали, что изменения формы поля при увеличении напряженности поля от 8 до 13 кгс невелики. Как и следовало ожи-



Р и с. I. Измеренные зависимости напряженности магнитного поля от азимута при 8 и 13 кгс.

дать, они наиболее заметны вблизи углов - у краев полусных наконечников: в результате насыщения спад поля по азимуту у края полюса становится менее крутым. Расчет показал, что изменения амплитуд гармоник невелики, причем относительные изменения больше для высших гармоник.

Наибольшее влияние на частоты бетатронных колебаний оказывает, однако, изменение отношения постоянной составляющей к основной гармонике. Так, для рабочей точки КФ ФИАН ($a_0/a_H = 0,11$) изменение постоянной составляющей a_0 равно - 1%, а основной гармоники $a_H = - 0,8\%$, что приводит к уменьшению отношения a_0/a_H на $\sim 0,2\%$. Это изменение соответствует сдвигу частот аксиальных и радиальных бетатронных колебаний $\Delta\nu_r \leq 0,01$ и $\Delta\nu_z \leq 0,003$. Влияние высших гармоник малых амплитуд ($a_{1H}/a_H < 0,1$) на частоты само по себе мало /10/, а переход от 8 кэ к 13 кэ связан с их относительным изменением меньшим 10%, что дает $\Delta\nu_z \leq 0,002$ (ν_r изменяется еще незначительней). Таким образом, суммарное изменение частот бетатронных колебаний из-за влияния насыщения пренебрежимо мало: $\Delta\nu_z \leq 0,012$ и $\Delta\nu_r \leq 0,003$.

Таким образом, экспериментально показана возможность повышения напряженности магнитного поля в магнитной системе кольцевого фазотрона по меньшей мере до 13 кэ. Это означает, что в габаритах установки КФ (макс. радиус орбиты 1,6 м) возможно создание ускорителя электронов с максимальной энергией 100 Мэв и с интенсивностью пучка, характерной для фазотронов, т.е. определяемой частотой повторения циклов и мощностью ускоряющей высокочастотной системы.

Авторы выражают большую благодарность А. М. Майне и Л. Н. Чекановой за помощь при проведении экспериментов.

Поступила в редакцию
22 февраля 1972 г.

Л и т е р а т у р а

1. А. А. Коломенский, А. Н. Лебедев. Теория циклических ускорителей. Физматгиз, 1962 г., стр. 298.
2. Л. Н. Казанский, В. Н. Канунников, А. А. Коломенский, В. А. Пападищев, А. П. Фатеев, Б. Н. Яблоков. Труды Всесоюзного

- совещ. по ускорителям заряженных частиц, 1968 г. ВИНТИ (1970), т. II, стр. 351.
3. В. Н. Канунников, А. А. Коломенский, А. Н. Лебедев и др. ПТЭ № 5, 71 (1967).
 4. В. Н. Канунников, А. А. Коломенский, В. А. Пападичев. Кр. сообщения по физике № 2, 18, (1970).
 5. В. Н. Канунников, А. А. Коломенский, В. А. Пападичев. Труды II Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, 1970 г. (в печати).
 6. F. T. Cole et al. Rev. Sci. Instrum., 35, 1393 (1964).
 7. W. Heinz. Nucl. Instrum. and Meth., 45, 102, 197 (1966).
 8. В. А. Пападичев. Препринт ФИАН, № 69, 1969 г.
 9. В. Н. Канунников. Измерительная техника, № 10, 76 (1971).
 10. В. А. Пападичев. Кандидатская диссертация, ФИАН, 1971 г.