



## Микротрон на 6,5 Мэв для инъекции электронов в синхротрон

К. А. Беловинцев, А. Я. Беляк, А. М. Громов,  
Е. М. Мороз, П. А. Черенков

Рассмотрена возможность использования микротрона в качестве внешнего инжектора электронов в синхротрон. Описана конструкция и приведены результаты запуска микротрона на энергию 6,5 Мэв.

### Введение

У большинства синхротронов на энергии до 500 Мэв в качестве источника электронов обычно используется внутренний инжектор, размещаемый в ускорительной камере, вблизи внешней границы рабочей области ускорителя. Как правило, энергия инжектируемых электронов в этом случае составляет 50—100 кэв, что делает необходимым предварительное ускорение электронов до энергий порядка 3—4 Мэв ( $\beta = \frac{v}{c} \approx 1$ ), и только после этого начинается собственно синхротронное ускорение. При этом предварительное ускорение электронов осуществляется с помощью классического бетатронного режима ускорения, т. е. за счет вихревой электродвижущей силы.

В синхротронах на энергии выше 500 Мэв обычно используется высоковольтная инъекция электронов (с энергией в несколько мегаэлектронвольт), получаемых от внешнего источника. При этом значения впускного магнитного поля оказываются достаточными для обеспечения требуемой формы поля с необходимой точностью. В этом случае отпадает необходимость предварительного ускорения электронов в бетатронном режиме или вариации частоты ускоряющего напряжения в синхротроне. Конечно, при высоковольтной инъекции возникают свои проблемы, связанные с необходимостью проведения инжектируемого пучка по тракту ввода. Однако, как известно, эти проблемы не являются определяющими и успешно разрешены на всех крупных ускорителях.

При высоковольтной инъекции выбор способа предварительного ускорения электронов

(генератор Ван де Граафа, импульсный генератор, линейный ускоритель и т. д.) определяется стремлением получить на выходе ускорителя-инжектора возможно большую интенсивность пучка электронов с учетом других параметров пучка, например разброса энергии, угловой расходимости и т. д., которые имеют важное значение с точки зрения эффективности захвата.

Нами детально рассмотрена возможность использования в качестве инжектора электронов ускорителя типа микротрон, идея которого была предложена еще в 1944 г. [1]. (Первая успешная попытка применения микротрона в качестве инжектора принадлежит Вернхольму [2]. Однако подробного сообщения об этом до сих пор нет.)

Анализ данных показал, что относительно высокая интенсивность пучка электронов, достигнутая в уже существующих микротронах [2, 3] ( $\sim 20$  ма в импульсе), простота конструкции и вывода из ускорителя значительной части электронов, высокая степень моноэнергетичности электронов, малая угловая расходимость пучка, а также некоторые другие особенности микротрона делают этот ускоритель весьма перспективным для использования в качестве инжектора синхротрона.

Для экспериментальной проверки некоторых из полученных выводов нами был разработан и запущен микротрон, рассчитанный на ускорение электронов (на первом этапе) до 6,5 Мэв.

Испытание микротрона как инжектора предполагается провести на синхротроне Физического института им. П. Н. Лебедева АН СССР (ФИАН) на 280 Мэв.



**Оценка эффективности микротрона как инжектора электронов в синхротрон на 280 Мэв**

При высоковольтной инжекции значительно уменьшается эффект кулоновского отталкивания электронов в пучке синхротрона. Это приводит к существенному возрастанию предельного числа  $N_{\text{макс}}$  электронов, которые могут быть удержаны на синхротронной орбите фокусирующими силами.

Можно показать, что величина  $N_{\text{макс}}$  выражается следующим образом:

$$N_{\text{макс}} \simeq 10^{13} \frac{e^2}{R} (1-n) \gamma (\gamma^2 - 1), \quad (1)$$

где  $e$  — полуширина рабочей области;  $R$  — радиус равновесной орбиты;  $n$  — показатель спада магнитного поля;  $\gamma = 1 + \frac{W}{E_0}$  — относительная энергия электронов. Для рассматриваемого ускорителя  $e = 6$  см,  $R = 82$  см,  $n = \frac{2}{3}$ , энергия инжекции  $W_i = 70$  кэв.

Из этой формулы, в частности, следует, что переход от энергии инжекции 70 кэв к энергии инжекции  $\sim 6$  Мэв (энергии, которую легко получить, используя в качестве инжектора микротрон) приводит к возрастанию  $N_{\text{макс}}$  более чем в 6000 раз.

Разброс по энергии инжектируемых в синхротрон электронов должен быть

$$\frac{\Delta E}{E_0} \ll \frac{e}{R} (1-n) \left( \gamma - \frac{1}{\gamma} \right) \simeq 0,3. \quad (2)$$

Пучок электронов, полученный в микротроне, имеющий  $\frac{\Delta E}{E_0} \simeq 5 \cdot 10^{-2}$ , вполне удовлетворяет этому требованию, что является фактором, благоприятствующим высокой эффективности захвата электронов в режим синхротронного ускорения.

Угловые характеристики пучка электронов, ускоренного на микротроне, также весьма благоприятны для эффективного захвата этих электронов. Предельные значения допустимой угловой расходимости инжектируемых электронов можно оценить по формулам для угла разброса по вертикали

$$\alpha_z < \frac{h \sqrt{n}}{2R};$$

для угла разброса в радиальном направлении

$$\alpha_R < \frac{\sqrt{2k(1-n) e \Delta R}}{3R}.$$

Применительно к рассматриваемому случаю (считая, что при инжекции число эффективных оборотов  $k=5$ , а шаг сворачивания орбиты  $\Delta R=0,2$  см) эти формулы дают

$$(\alpha_z)_{\text{инж}} < 6 \cdot 10^{-2} \quad \text{и} \quad (\alpha_R)_{\text{инж}} < 10^{-2}.$$

Оценка аналогичных параметров микротронного пучка дает следующие значения:

$$(\alpha_z)_{\text{микр}} \simeq \frac{d}{\lambda \gamma^2} \simeq 10^{-3},$$

где  $d$  — диаметр отверстия в резонаторе;  $\lambda$  — длина волны;

$$(\alpha_R)_{\text{микр}} \leq 10^{-2},$$

что также способствует высокой эффективности захвата в режим синхротронного ускорения. Оценка приводит к значению  $\eta \geq 0,1$ .

Используя типичные для современных микротронов [2, 3] данные (ток пучка  $I \simeq 0,02$  а в импульсе длительностью  $\tau \simeq 2$  мксек), нетрудно оценить число  $N$  электронов, которые могут быть захвачены в синхротронный режим ускорения при использовании микротрона в качестве инжектора. Эта оценка дает  $N \simeq 6,25 \cdot 10^{12} \eta I_{(a)} \tau_{(мксек)} > 2,5 \cdot 10^{10}$  электронов.

Проведенный анализ показал, что микротрон уже на современном уровне развития ускорителей этого типа является весьма эффективным инжектором для синхротрона. Несомненно, что дальнейшее усовершенствование микротрона (главным образом увеличение интенсивности) сделает его еще более перспективным для целей инжекции.

Приведем краткое описание микротрона ФИАН на энергию 6,5 Мэв, запущенного в октябре 1961 г.

**Магнит и вакуумная система**

Общий вид микротрона со снятым верхним полюсом магнита показан на рис. 1. Полюса магнита (диаметром 600 мм) и плиты изготовлены из Ст. 3, а яра из железа марки Армко. Для увеличения рабочей области магнитного поля на полюса наложены кольцевые стальные шиммы циклотронного типа, при этом диаметр рабочей области составляет около 500 мм. Значения относительных неоднородностей магнитного поля в пределах рабочей области, измеренные с помощью метода ядерного резонанса, не превышают 0,3% и максимальны в областях, наиболее близких к ярам магнитопровода.



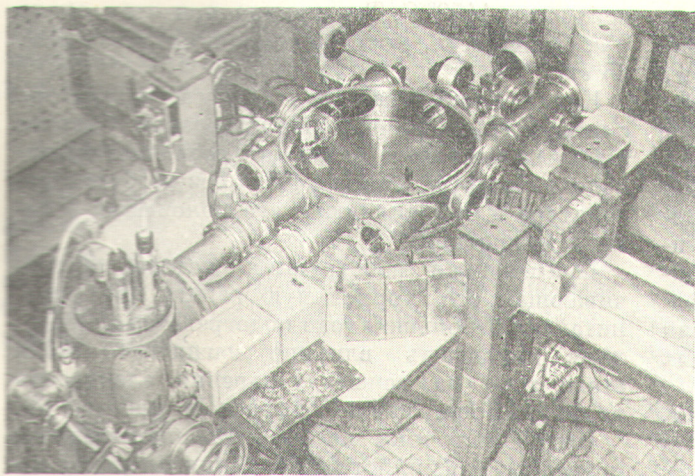


Рис. 1. Общий вид микротрона (в плане) со снятой верхней крышкой магнита.

Обмотка питания магнита имеет естественное воздушное охлаждение и изготовлена из медного провода (диаметром 5 мм), изолированного стекловолокном. Магнитопровод и обмотка питания рассчитаны с четырехкратным запасом по отношению к номинальному режиму.

Мощность питания магнита в рабочем режиме ( $H \approx 1000$  э) составляет приблизительно 450 вт. Общий вес магнита микротрона с обмоткой равен 2 т. Питание магнита стабилизировано с точностью  $\sim 0,03\%$ .

Вакуумная система ускорителя состоит из форвакуумного насоса типа ВН-1, 500-литрового паромасляного насоса М-5, азотной ловушки жалюзного типа с отражателем, вакуумного затвора ДУ-160, вакуумпровода и камеры ускорителя. Ловушка потребляет 5 л жидкого азота за 10 ч непрерывной работы (без доливок).

Вакуумная камера микротрона изготовлена из листовой латуни и представляет собой кольцо с девятью впаянными патрубками (см. рис. 1). Крышками камеры служат полюса магнита. Для ввода в камеру подвижных элементов используются вильсоновские уплотнения. Электрические вводы осуществляются через проволочные изоляторы, сделанные из эпокси-двой смолы.

Для предварительной откачки камеры ускорителя при горячем паромасляном насосе имеется обводная вакуумная система. При этом выход паромасляного насоса подсоединяется к компенсационному объему. Такая система откачки позволяет получать рабочий вакуум

( $\sim 2 \cdot 10^{-6}$  мм рт. ст.) в камере ускорителя через 1,3 ч после включения, а при горячем паромасляном насосе через 25 мин.

На случай внезапного ухудшения вакуума в камере до давления выше  $10^{-4}$  мм рт. ст. предусмотрена аварийная система выключения, которая автоматически отсоединяет камеру от паромасляного насоса.

### Высокочастотная система

Высокочастотная система микротрона в первых опытах была осуществлена по общепринятой схеме [3]: магнетронный генератор, фазовращатель, тройник в плоскости  $E$ , ускоряющий резонатор и стабилизирующая водяная нагрузка.

Магнетронный генератор 10-сантиметрового диапазона дает импульсы длительностью 3 мксек при частоте повторения 50 гц. Прямоугольный волновод имеет сечение  $72 \times 44$  мм<sup>2</sup> и работает на основном типе волны  $H_{01}$ . Конструкция плоского цилиндрического резонатора аналогична описанной в работе [3]. Резонатор и тройник изолированы от атмосферы с помощью перегородок (из фторопласта-4 толщиной 2 мм), установленных в стандартных дроссельных соединениях перед тройником со стороны водяной нагрузки и фазовращателя. В таком виде высокочастотная система позволила осуществить запуск микротрона. Фторопластовые перегородки почти не ухудшали коэффициента стоящей волны волноводного тракта, но нуждались в тренировке при низких уровнях мощности высокочастотного генератора для устранения пробоев по их поверхности.

Следует отметить, что для этого варианта высокочастотного тракта существенно, чтобы длина волновода от резонатора до характеристического сечения тройника не была равна целому числу полуволн. Если это условие не выполняется, то при расстроенном резонаторе энергия в стабилизирующую водяную нагрузку не поступает и величина коэффициента стоящей волны в тракте от магнетрона до тройника становится недопустимой для работы магнетронного генератора.

В дальнейшем при настройке волноводного тракта микротрона оказалось возможным отказаться от водяной нагрузки и в качестве развязывающего элемента использовать феррито-



вый вентиль [4], что значительно облегчило настройку высокочастотной системы. Помимо хорошего согласования генератора с трактом, ферритовый вентиль позволяет плавно регулировать проходящую мощность путем изменения постоянного тока в обмотках его магнита. Потери в ферритовом вентиле, соответствующие максимальному затуханию в обратном направлении, составляют около 25% подводимой мощности. Такое изменение высокочастотного тракта позволяет примерно вдвое снизить требования к мощности магнетронного генератора для заданного уровня интенсивности ускоренных электронов.

Предварительные эксперименты показывают, что новая система высокочастотного тракта микротрона отличается простотой и удобством. Однако полный анализ этой системы требует дальнейшего исследования.

Системы индикации мощности в нагрузке и резонаторе, а также индикация формы огибающей импульса высокочастотного напряжения на резонаторе аналогичны описанным в работе [3].

#### Инжекция и вывод электронов

Для инжекции электронов в микротрон была разработана специальная конструкция катода (рис. 2). В качестве материала катода использован борид лантана  $LaB_6$ , запрессованный в танталовую трубку. Подогревателем служит

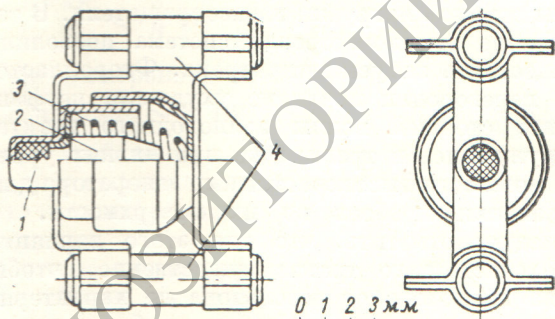


Рис. 2. Конструкция катода:

1 — борид лантана; 2 — молибденовый стержень; 3 — спираль из вольфрама диаметром 0,3 мм (шаг спирали 0,6 мм); 4 — фарфоровые стержни.

коническая спираль из вольфрамовой проволоки (диаметром 0,3 мм). Для уменьшения потерь энергии на тепловое излучение спираль окружена двумя танталовыми отражателями.

Катод обеспечивает устойчивый эмиссионный ток 400 мА при температуре эмитирующей по-

верхности  $1450^\circ\text{C}$ . Ток накала при этом около 6 А, а мощность, потребляемая подогревателем, 35 Вт.

Катод изолирован от корпуса резонатора с помощью фторопластовых прокладок. Система крепления катода к резонатору позволяет производить быструю замену катода без разборки резонатора и без изменения его положения в камере микротрона.

Примененная конструкция катода, обеспечивающая его нормальную работу при сравнительно небольшом токе подогревателя, позволила исключить влияние магнитного поля этого тока на режим ускорения электронов в микротроне, наблюдавшееся в работе [3].

Индикация тока на орбитах производится посредством осциллографирования сигнала с латунного зонда, перемещающегося по диаметру камеры, а также путем наблюдения с помощью телевизионного устройства яркости и формы светящегося пятна на люминесцентном покрытии, имеющемся на этом зонде. Простая система из двух зеркал, одно из которых укреплено непосредственно на зонде, позволяет проектировать на приемную телевизионную трубку изображение пучка с любой орбиты практически без искажений.

Для вывода электронов из микротрона использован магнитный канал, выполненный в виде конической трубы из мягкой стали с диаметром входного отверстия 7 мм. Для подбора оптимальных угловых и энергетических параметров выведенного пучка предусмотрена возможность вывода электронов с любой из последних трех орбит.

Перемещение магнитного канала в вакуумной камере производится дистанционно с пульта управления. С помощью специального устройства канал мог быть установлен в оптимальное положение относительно орбиты. Индикация этого положения могла производиться двумя путями: по минимуму свечения на входном торце канала (покрытом люминофором), определяемому с помощью телевизионного устройства, и по минимуму амплитуды импульса тока от электронов пучка, попадающих на стенки канала.

Измерения величины выведенного тока электронов производились с помощью графито-латунного цилиндра Фарадея.

Примененная система позволила осуществить вывод 90% электронов с последней орбиты микротрона. Потери при выводе, составляющие 10%, объясняются тем, что выводное устройство нарушает однородность магнитного



поля ускорителя, что приводит к некоторому смещению центров кривизны предыдущих орбит и к сползанию равновесной фазы.

### Работа ускорителя

Все управление работой ускорителя сосредоточено на пульте управления и осуществляется дистанционно. Пультовое помещение микротрона отделено от зала микротрона разборной стенкой толщиной 1 м, собранной из бетонных блоков.

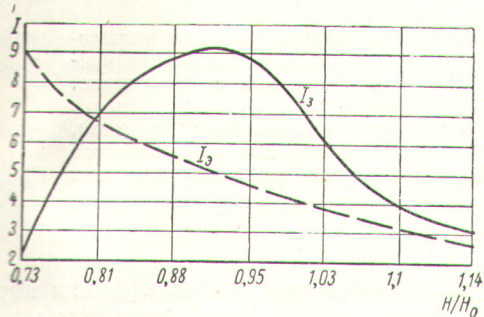


Рис. 3. Зависимость интенсивности пучка микротрона от величины магнитного поля при постоянстве остальных параметров. Пунктирная кривая дает значение тока эмиссии катода.

Настройка микротрона на оптимальный режим работы производится с помощью регулировки тока накала катода и подстройки частоты резонатора. При этом значения магнитного поля микротрона, тока через обмотку магнита ферритового вентиля и мощности высокочастотного генератора уславливаются на основа-

нии расчетных данных и предварительных экспериментов.

Измерения показали, что максимальная величина тока на последней, одиннадцатой, орбите микротрона достигает 22 ма при длительности импульса около 2 мксек и, кроме первых двух орбит, практически постоянна.

На рис. 3 приведена экспериментально измеренная зависимость тока на зонд на восьмой орбите микротрона от величины магнитного поля. В этих измерениях при каждом значении поля микротрона ток эмиссии катода подбирался так, чтобы на зонде интенсивность пучка была максимальной. Остальные параметры оставались постоянными. Кривая имеет отчетливый максимум. Положение этого максимума совпадает со значением магнитного поля, соответствующего работе микротрона на автоэлектронной эмиссии (ускоренный ток автоэмиссионных электронов составлял в нашем случае 0,5 ма в импульсе).

Диаметр пучка на последней орбите в среднем равен 4 мм, однако, меняя значение равновесной фазы, можно значительно деформировать пучок как в радиальном, так и в вертикальном направлениях.

В заключение авторы пользуются случаем выразить благодарность сотрудникам Института физических проблем АН СССР С. П. Капице, В. П. Быкову и В. Н. Мелехину за полезные консультации при разработке конструкции микротрона, а также В. И. Гридасову, В. С. Малофееву и А. Г. Борисову за помощь в разработке отдельных узлов ускорителя, Н. Г. Котельникову за наладку вакуумной системы.

Поступила в Редакцию 27/VI 1962 г.

### ЛИТЕРАТУРА

1. В. И. Векслер. «Докл. АН СССР», 43, 436 (1944); J. Phys. USSR, 9, 153 (1945).
2. Sci. and Industry, 8, No. 5, 9 (1961).
3. С. П. Капица, В. П. Быков, В. Н. Мелехин. «Ж. эксперим. и теор. физ.», 41, 368 (1961).
4. H. Reich. Nucl. Instrum. Metals, 3, 97 (1958).

