

## ИМПУЛЬСНЫЙ БЕЗЖЕЛЕЗНЫЙ СИНХРОТРОН

Е. А. Абрамян, И. Е. Бендер, Г. И. Будкер, А. Х. Кадымов,  
А. А. Наумов и В. С. Панасюк

Дается краткое описание действующей модели импульсного безжелезного синхротрона, рассчитанной на проектную энергию 150—200 Мэв.

Ускоритель представляет собой двухпромежуточный рейстрек, безжелезная магнитная система которого выполнена в виде коаксиала сложного профиля, свернутого в тороид. Результирующая сила магнитного давления на внутреннюю токонесущую шину равна нулю. Показатель спада ведущего магнитного поля задается формой токонесущих поверхностей, так как толщина скин-слоя при выбранной частоте питающего магнит тока много меньше характерных размеров системы. Модель была запущена в 1957 г. на энергии 70 Мэв, подтвердив правильность принципов, заложенных в конструкцию ускорителя, после чего была разобрана.

В ряде лабораторий делались попытки разработать циклический ускоритель, в котором управляющее магнитное поле создается безжелезными электромагнитами (например, [1, 2]). Успешное решение задачи

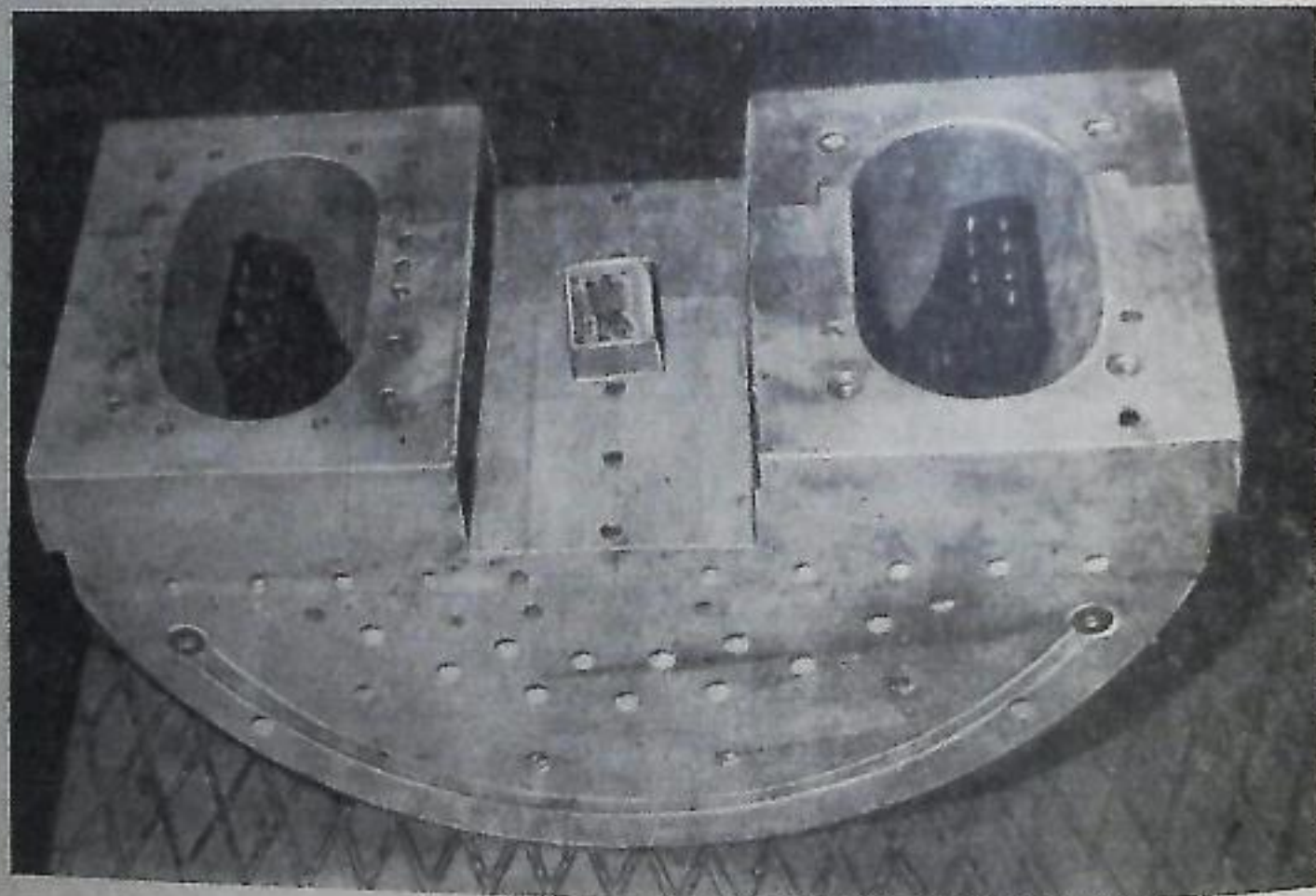


Рис. 1. Одна из половин синхротрона после разборки.

создания безжелезных электромагнитов с большими магнитными полями позволит существенно уменьшить размеры и стоимость ускорителя.

Для проверки возможности создания импульсного синхротрона с одновитковым безжелезным электромагнитом нами в 1956 г. была разработана [3, 4] и в 1957 г. запущена действующая модель импульсного безжелезного синхротрона, рассчитанная на энергию 150—200 Мэв. Ниже дается краткое описание модели и экспериментов по ее запуску.

## 1. Общие сведения

Ускоритель представляет собой импульсный безжелезный одновитковый синхротрон с бетатронным предускорением. Орбита имеет два прямолинейных участка. Питание синхротрона осуществляется от конденсаторных батарей через трехэлектродные воздушные разрядники.

Основные расчетные параметры ускорителя: радиус кривизны равновесной орбиты 17.4 см; длина прямолинейных промежутков 4.5 см; апертура области ускорения  $2\Delta r - 2.5$  см,  $2\Delta z - 3$  см; показатель спада магнитного поля  $n = 0.57 \pm 0.02$ ; магнитное поле на орбите при энергии 200 Мэв — 38 тыс. эрст.; энергия инжекции до 50 Кэв; энергия бетатронного предускорения 2 Мэв; длина волны в генераторе 19.8 см; амплитуда напряжения на резонаторе 15 кв; полное время ускорения 100 мксек.; частота повторения циклов ускорения 1 имп. в 15 сек.; индуктивность безжелезного магнита ускорителя 200 см; ток разряда синхротронной конденсаторной батареи при энергии 200 Мэв 500 000 а. Вес камеры 100 кг.

Для осуществления бетатронного режима в цепь разряда введена дополнительно большая индуктивность ( $L$  на рис. 5). Бетатронный режим не является характерным для ускорителей этого типа и был введен только на данной установке, рассматривавшейся как модель более крупных ускорителей. На рис. 1 приведена фотография камеры синхротрона после разборки.

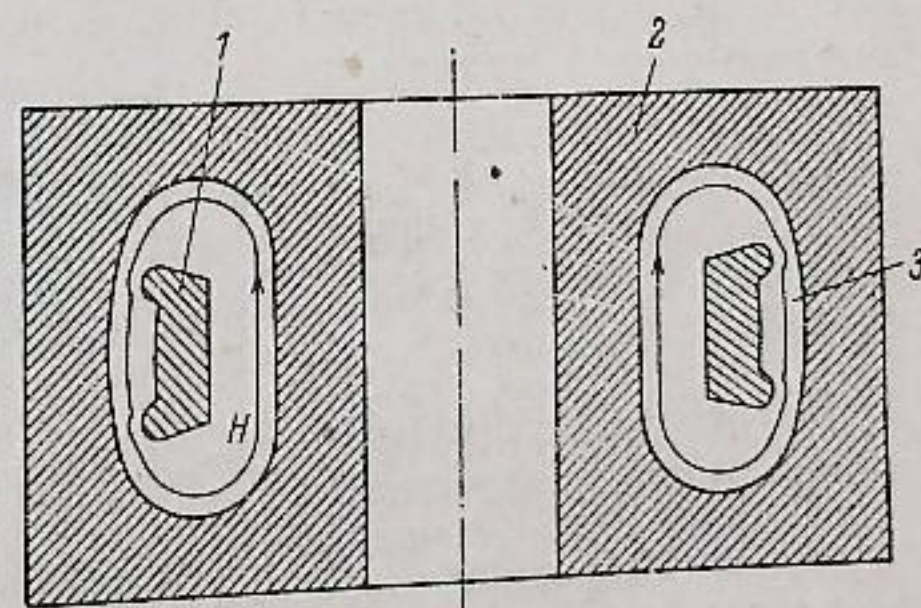
## 2. Магнитная система

Безжелезная магнитная система синхротрона представляет собою коаксиал сложного профиля, свернутый в тороид. Внешний токонесущий проводник коаксиала служит одновременно вакуумной камерой.

Рабочая область располагается между центральной шиной коаксиала и его стенкой. Рис. 2 представляет разрез камеры синхротрона, рис. 3 — схему направления токов в коаксиале.

Одной из особенностей этой магнитной системы является то обстоятельство, что толщина скин-слоя при выбранной длительности импульса тока много меньше характерных размеров системы, в связи с чем форма магнитного поля в рабочей области целиком определяется формой токонесущих поверхностей внутренней шины и наружного кожуха коаксиала.

Первоначальный подбор формы профиля производился на электролитической ванне, а окончательный — магнитными измерениями на моделях. Эти данные, а также непосредственная проверка магнитных полей на ускорителе как измерениями, так и по движению пучка полностью подтвердили исходные предположения, положенные в основу конструкции синхротрона. Было показано, что надлежащим подбором профиля поверхностей, выполненных с точностью, легко достигаемой при станочной обработке, может быть создано магнитное поле с требуемым показателем спада на всей ширине дорожки ускорителя. После изготовления ускорителя магнитное поле полностью соответствовало

Рис. 2. Разрез камеры синхротрона.  
1 — центральная шина коаксиала (медь); 2 — внешний токопровод (дюралюминий); 3 — область движения частиц.

заданному, выбранному на основании измерений на модели, и не потребовало никакой дополнительной коррекции. Значение показателя спада магнитного поля лежит в пределах  $\lambda = 0.57 \pm 0.02$  в области  $\pm 12.5$  мм — по радиусу (т. е. от одной токонесущей поверхности до другой) и  $\pm 15$  мм от медианной плоскости — по высоте.

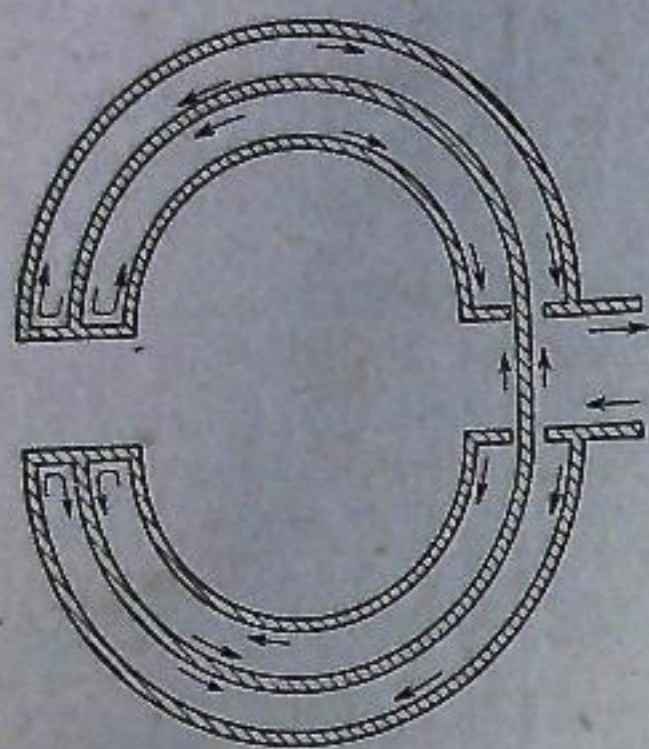


Рис. 3. Схема направления токов в коаксиале.

Через  $L_c$  обозначена эквивалентная индуктивность внутренней части ускорительной камеры (фигурного коаксиала), равная 200 см.  $L_b = 150$  см — индуктивность контура  $abcd$ , образованного шиной и внешней частью одной из половин камеры, создающего бетатронный поток через площадь орбиты;  $L$  — балластная индуктивность;  $R_c, R_b, R$  — эффективные значения соответствующих активных сопротивлений.

Последовательность процессов в рабочем цикле ускорителя ясна из схемы на рис. 6.

#### 4. Некоторые элементы конструкции ускорителя

##### а) Магнитные экраны (лабиринты)

Магнитные экраны (4 на рис. 5) служат для защиты в период бетатронного предускорения области внутри камеры от проникновения в нее магнитного поля бетатронного потока при одновременном беспрепятственном проникновении создаваемого этим потоком вихревого электрического поля [7]. Лабиринты синхротрона обеспечивают ослабление проникающего магнитного поля в 10 000 раз.

##### б) Электронная пушка

Инжектор с вольфрамовым ленточным катодом при энергии 30–50 КэВ обеспечивает более 50% эмиттируемого тока в угле  $\pm 1^\circ$ . Предусмотрена возможность менять направление вылета электронов посред-

ством перемещения катода по отношению к аноду. Срок службы катода при токе эмиссии 200 ма — 200 час. Подробное описание инжектора дано в [5].

#### 3. Схема питания, рабочий цикл ускорителя

На рис. 4 дана конструктивная схема ускорителя (разрез в плане) вместе со схемой его питания, на рис. 5 — упрощенная эквивалентная схема.

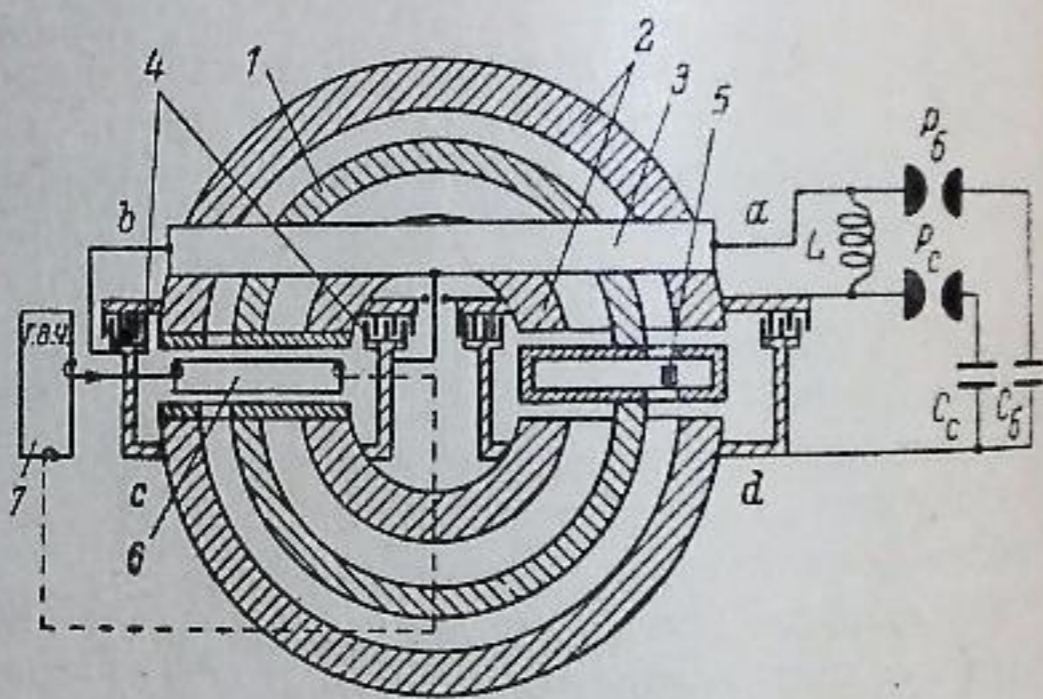


Рис. 4. Конструктивная схема ускорителя в плане и схема питания.

1 — внутренняя шина; 2 — камера; 3 — условно показана шина, наложенная сверху на камеру, необходимая для бетатронного ускорения; 4 — лабиринты, обеспечивающие магнитное экранирование рабочей области; 5 — электронная пушка; 6 — резонатор; 7 — генератор высокой частоты;  $P_b$  и  $P_c$  — управляемые разрядники;  $C_b$  и  $C_c$  — конденсаторные батареи.

В качестве ускоряющего элемента использовался цилиндрический резонатор с длиной волны 19.8 см. Резонатор возбуждался от автогенератора, работающего на металлокерамическом триоде типа ГИ-17. Полезная мощность генератора — 10 кВт в импульсе длительностью до 100 мксек. Напряжение на резонаторе — 15 кв.

В качестве ускоряющего элемента использовался цилиндрический резонатор с длиной волны 19.8 см. Резонатор возбуждался от автогенератора, работающего на металлокерамическом триоде типа ГИ-17. Полезная мощность генератора — 10 кВт в импульсе длительностью до 100 мксек. Напряжение на резонаторе — 15 кв.

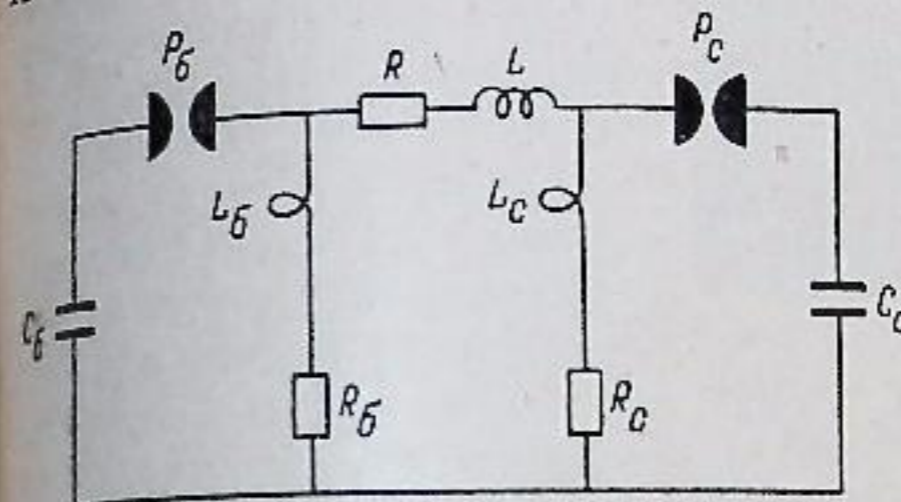


Рис. 5. Упрощенная эквивалентная схема электрических цепей ускорителя.

#### 5. Особенности налаживания безжелезного синхротрона. Запуск ускорителя

Как уже было отмечено выше, магнитное поле ускорителя сразу после изготовления имело форму, полностью соответствующую подобранной ранее на модели, и не потребовало никакой дополнительной коррекции.

Основные трудности при запуске синхротрона оказались связанными с налаживанием бетатронного режима предускорения. Индуктивность магнитной системы ускорителя мала и сравнима с индуктивностью конструктивных элементов в подводящих цепях. В течение времени ускорения из-за прорастания магнитного поля в глубь металла соотношение

величин этих индуктивностей, а также  $\frac{L}{R}$  для них меняются. Вместе с тем меняется отношение индуктивностей и соотношение величины  $\frac{L}{R}$

контуров, создающих поле на орбите и поток бетатронного ускорения. Эти факторы, а также наличие паразитных связей между магнитными потоками в подводящих цепях, в совокупности создали сложную картину изменения во времени соотношения между полем на орбите и магнитным потоком, создающим напряжение на обходе. Вследствие этого пришлось принять меры для того, чтобы бетатронное соотношение 2:1 выполнялось в течение всего времени бетатронного предускорения. Эти меры заключались в шунтировании элементов схемы цепями с заданным законом изменения отношения  $\frac{L}{R}$  во времени, а также в ослаблении некоторых паразитных связей.

Следует заметить, что упомянутые трудности в налаживании бетатронного режима не носят общего характера для безжелезных ускорителей

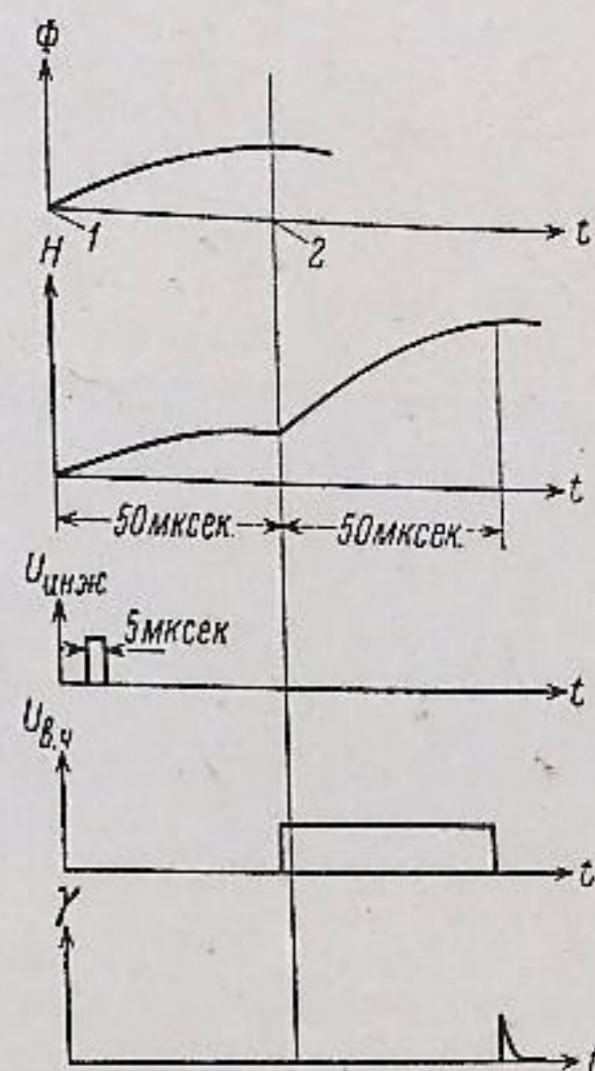


Рис. 6. Последовательность процессов рабочего цикла ускорителя.

$\Phi$  — бетатронный поток;  $H$  — магнитное поле на орбите;  $U_{инж}$  — напряжение на инжекторе;  $U_{в.ч.}$  — огибающая напряжения на резонаторе;  $\gamma$  —  $\gamma$ -излучение в момент сброса ускоренного пучка.

1 — момент включения  $P_b$ , 2 — момент включения  $P_c$ .

такого типа, а определяются конкретными конструктивными особенностями данной машины, прежде всего ее малыми размерами. Кроме того, бетатронное предускорение невыгодно в ускорителях такого типа и осуществлялось только на этом модельном синхротроне в связи с тем, что в период его разработки не имелось возможности применить внешнюю инжекцию релятивистских электронов, которую предполагалось использовать в последующих вариантах.

Бетатронный режим ускорения был осуществлен на синхротроне в феврале 1957 г. Электроны ускорялись до энергии 2 Мэв, дающей

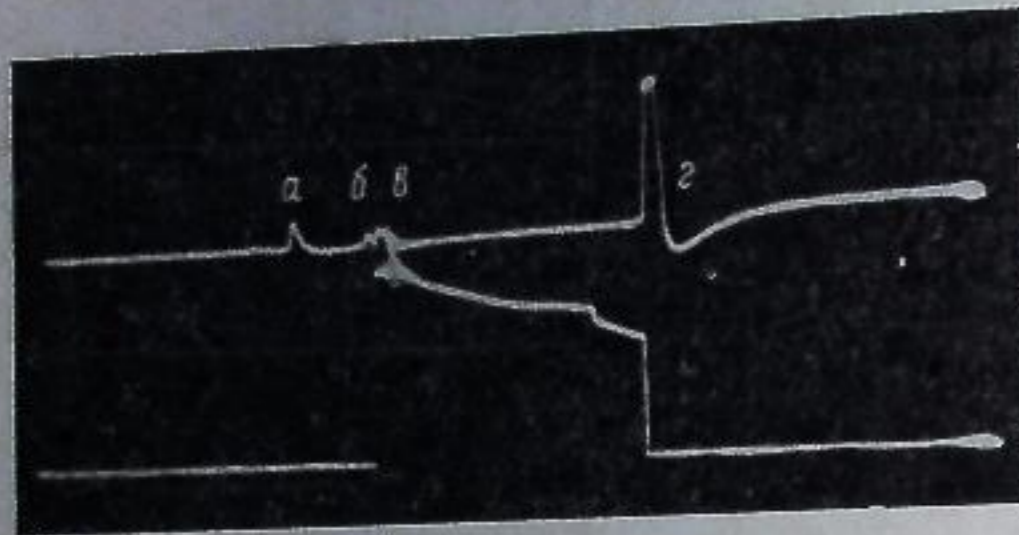


Рис. 7. Сигнал с ФДУ (верхний луч) и огибающая напряжения на резонаторе (нижний луч).

$\gamma$ -излучение в областях *а, б, в* соответствует потерям в конце бетатронного ускорения при захвате в синхронный режим и в момент включения синхротронного поля; *г* — основной пик излучения от электронов, ускоренных до максимальной энергии (снят в режиме сильного зарезания сигнала).

возможность переходить в синхротронный режим без перестройки частоты высокочастотного генератора. Летом 1957 г. было получено ускорение в синхротронном режиме до энергии порядка 70 Мэв. На рис. 7 дана осциллограмма импульса тормозного  $\gamma$ -излучения ускорителя, представленная вместе с импульсом огибающей высокочастотного напряжения. Осциллограмма снята в режиме сильной нелинейности тракта усиления фотоумножителя с тем, чтобы наряду с конечным пиком  $\gamma$ -излучения от ускоренных электронов можно было просматривать потери частиц в период ускорения. Видно, что малые потери имеются лишь в конце цикла бетатронного предускорения при захвате в синхротронный режим и в момент включения разрядника синхротронной батареи. Потери электронов в течение цикла синхротронного ускорения отсутствуют.

Строительство и запуск описанного синхротрона подтвердили правильность основных принципов, заложенных в его конструкцию, и прежде всего — возможность с высокой точностью создавать магнитные поля заданной формы методом профилированных токонесущих поверхностей при малой толщине скин-слоя. Повышение магнитного поля до расчетной величины 38 кэрст. (что соответствует энергии частиц 200 Мэв) не производилось в связи с тем, что силовые испытания и опыты по коммутации больших токов были перенесены на другие модели.

В институте разрабатываются электронные и протонные ускорители на большие энергии, а также ускорители со встречными пучками, использующие этот способ создания ведущего магнитного поля [6].

В работе на отдельных ее этапах принимали участие А. М. Стефановский, И. М. Самойлов, Л. И. Юдин, В. М. Волосов, Б. В. Чирков, Л. Н. Бондаренко, которым авторы выражают свою признательность.

#### Литература

- [1] W. B. Jones, H. R. Kratz, J. L. Lawson, D. H. Miller, R. D. Miller, G. L. Ragan, J. Rauvina, H. J. Voorhies. Rev. Sci. Instr., 26, 809—826, 1955.  
 [2] M. L. Oliphant. Proc. Roy. Soc. A234, 441, 1956. — [3] Г. И. Будкер, А. А. Наумов. Докл. на Международной конф. по физике высоких энергий, М., 1956. — [4] L'Âge. Nucléaire, № 1, 1956. — [5] И. М. Самойлов. ПТЭ, № 2, 1960. — [6] Е. А. Абрамян, В. Л. Ауслендер, В. Н. Байер, Г. А. Блинов, Л. Н. Бондаренко, Г. И. Будкер, С. Б. Вассерман, В. В. Ве-

чеславов, Г. И. Димов, Б. Г. Ерозолимский, А. В. Киселев, А. С. Коробейников, Е. А. Кушниренко, А. А. Лифшиц, Е. С. Миронов, А. А. Наумов, А. П. Онучин, В. С. Панасюк, В. А. Папачичев, С. Г. Попов, И. Я. Протопопов, С. Н. Родионов, В. А. Си- хоров, Г. И. Сильвестров, А. Н. Скринский, В. С. Сынах, А. Г. Ха- бахпашев, Л. Н. Юдин. Работы по встречным электрон-электронным, электрон-электронным и протон-протонным пучкам в Институте ядерной физики СО АН СССР. Докл. на Международной конф. по ускорителям, Дубна, 1963. — [7] Е. А. Абрамян, Л. Н. Бондаренко, В. И. Волосов, А. А. Наумов, Б. В. Чирков, ПТЭ, № 1, 1965.

Поступило в Редакцию  
6 апреля 1964 г.  
В окончательной редакции  
16 ноября 1964 г.