

Энергия и интенсивность ионов, которые будут ускорены в циклотроне У-400

Тип ускоряемых ионов	Энергия, Мэв/нуклон	Интенсивность внутреннего пучка, частиц/сек
Ne ₂₀ ⁺²	6,2	9 м·10 ¹⁴
Ne ₂₀ ⁺³	14,1	4·10 ¹⁴
Ne ₂₂ ⁺³	11,6	4·10 ¹⁴
Ar ₄₀ ⁺⁵	9,8	6·10 ¹³
Zn ₆₄ ⁺⁷	7,5	2,5·10 ¹³
Kr ₈₄ ⁺⁸	5,7	1,8·10 ¹³
Kr ₈₄ ⁺⁹	7,2	1,3·10 ¹²
Xe ₁₃₂ ⁺¹²	5,2	5·10 ¹¹
Xe ₁₃₂ ⁺¹³	6,1	10 ¹¹

ускорении ионов с прежним зарядом и, наконец, ускорить ионы с массой $A \leq 132$. В табл. 2 приведены интенсивность и максимальная энергия различных тяжелых ионов, которые будут ускорены на циклотроне У-400.

Система медленного наведения ускоренного пучка на внутренние мишени ускорителя ИФВЭ на энергию 70 Гэв

В. И. ГРИДАСОВ, А. А. КАРДАШ, К. М. КОЗЛОВ, О. В. КУРНАЕВ;
В. В. ЛАПИН, С. В. ЛОБАНОВ, Л. Л. МОЙЖЕС, К. П. МЫЗНИКОВ, А. А. НАУМОВ

УДК 621.384.6

Большинство физических экспериментов, использующих счетную методику, проводится на ускорителе ИФВЭ с пучками вторичных частиц, образуемыми на внутренних мишенях. На каждый из действующих каналов работает по нескольку мишеней. Положение мишеней внутри вакуумной камеры выбирается таким образом, чтобы обеспечить вывод в канал вторичных частиц в широком диапазоне импульсов с минимальными углами рождения. При этом удается получить большую интенсивность выведенных пучков вторичных частиц — до 10^6 частиц в импульсе. В оптимальном положении мишени смещены по радиусу относительно центра вакуумной камеры на расстояние вплоть до ± 5 см. Наведение ускоренного пучка на мишени производится в течение плоской части магнитного цикла ускорителя. Длительность наведения составляет 1,5 сек при стабильности поля ускорителя $4 \cdot 10^{-4}$ на уровне 12 кэ и относительной величине амплитуд пульсаций преобладающих частот 25, 50, 150 гц, равной $2 \div 3 \cdot 10^{-5}$.

Авторы выражают глубокую благодарность Г. Н. Флёрову за постоянное внимание к работе и И. Ф. Малышеву за ценные советы.

Поступила в Редакцию 13/V 1970 г.
В окончательной редакции 3/VIII 1970 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. И. А. Шелаев и др. Препринт ОИЯИ, 9-3988. Дубна, 1968.
2. В. С. Алфеев и др. Препринт ОИЯИ, Р-2693. Дубна, 1966.
3. И. А. Шелаев и др. Препринт ОИЯИ, Р-9-4233. Дубна, 1968.
4. Э. Г. Имаев и др. Препринт ОИЯИ, 9-3713. Дубна, 1968.
5. T. Johnson et al. IEEE Transaction on Nucl. Science, NS-16, 438 (1969).
6. K. W. Ehlers. Nucl. Instrum. and Methods, 18-19, 571 (1962).
7. Т. Таут и др. Сообщение ОИЯИ, 9-4368. Дубна, 1969.
8. Е. Д. Донец и др. Препринт ОИЯИ, Р7-4124. Дубна, 1968.
9. И. А. Шелаев и др. Препринт ОИЯИ, Р9-4831, 1969.
10. И. А. Шелаев и др. Сообщение ОИЯИ, Р9-5037. Дубна, 1970.

Для эффективного использования пучков вторичных частиц необходимо максимально увеличивать длительность вывода и ликвидировать модуляцию плотности выведенных пучков. В ускорителе ИФВЭ увеличение длительности вывода свыше 1 сек достигается уменьшением скорости наведения пучка на мишень до 3—5 мм/сек. При таких скоростях получить достаточно равномерные во времени интенсивности пучков и устранить модуляцию, определяемую пульсациями магнитного поля, можно только введением в систему наведения обратной связи по току частиц с мишени.

В этих условиях совершенно неприемлемы широко используемые на ускорителях методы наведения пучка на мишень путем изменения режимов ВЧ-ускорения [1]. Они не дают возможности смещать пучок на расстояние ± 5 см от равновесной орбиты без потери устойчивости и не позволяют ликвидировать временную структуру выведенного пучка. Описываемая ниже система наведения ускоренного пучка на внутренние мишени основана на искусст-

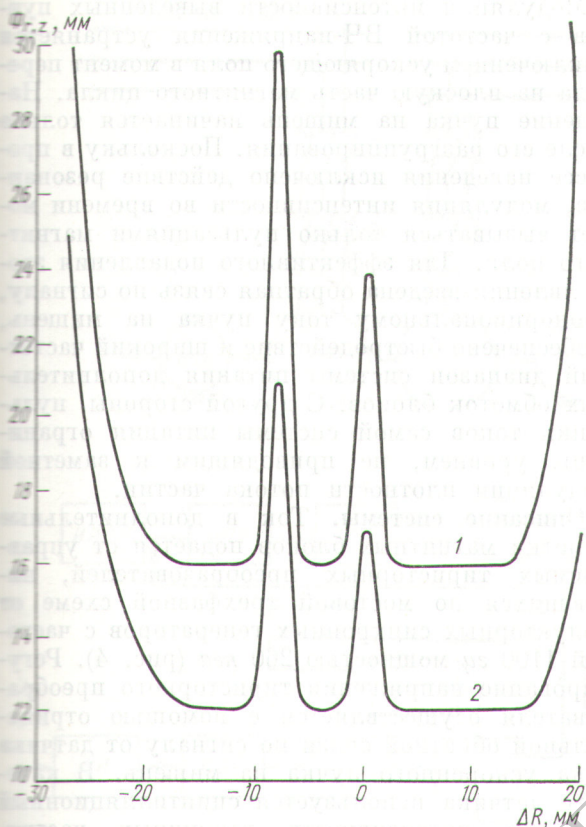


Рис. 1. Зависимость от радиуса ускорения горизонтальных (1) и вертикальных (2) размеров ускоренного пучка в фокусирующем радиусе блока.

вненном возбуждении азимутальной асимметрии магнитного поля ускорителя. От существующих систем [2, 3] она отличается значительно большим рабочим диапазоном положения мишени по радиусу и тем, что обеспечивает длительность выведенных пучков >1 сек при модуляции по плотности, не превышающей 10%.

Особенности движения пучка при наведении на мишень. Динамика частиц при наведении ускоренного пучка на внутренние мишени подробно рассмотрена в работе [4]. Было установлено, что нелинейные компоненты магнитного поля при 12 кэ вызывают сильную зависимость частоты радиальных Q_r и вертикальных Q_z бетатронных колебаний от радиуса орбиты. Вследствие этого при определенных радиусах орбиты могут появляться как линейные, так и нелинейные резонансы. Это усугубляется тем, что при наведении на мишень пучок движется в постоянном магнитном поле длительное время, превышающее 1 сек.

Экспериментальная проверка полностью подтвердила это положение. На рис. 1 показана зависимость горизонтальных и вертикальных размеров ускоренного пучка от его движения на различных радиусах в течение плоской части магнитного поля при $H = 12$ кэ. Пучок полностью теряется при смещении внутрь от центральной орбиты на 3 см и наружу на 2 см, что соответствует расчетному положению целого и параметрического резонансов. В промежутке между ними размеры пучка увеличиваются из-за действия нелинейных резонансов. Наличие резонансов может существенно уменьшить эффективность взаимодействия пучка с мишенью и ухудшить временную структуру выведенных пучков. Поэтому методы, использующие искусственное расширение (сжатие) орбиты, полностью исключаются.

Рациональнее держать ускоренный пучок в невозмущенной области вблизи центральной орбиты, а само наведение производить методом, не нарушающим вертикальной и радиальной устойчивости пучка. С этой целью был выбран метод возбуждения локальных искажений орбиты. Локальное искажение орбиты протяженностью, близкой к половине волны бетатронных колебаний, создавалось возбуждением в двух блоках добавочного поля величиной до $\Delta H/H = \pm 3\%$.

Форма искаженной орбиты приведена на рис. 2. Расчеты показали, что при искажениях, соответствующих кривой 1, сдвиг частот при

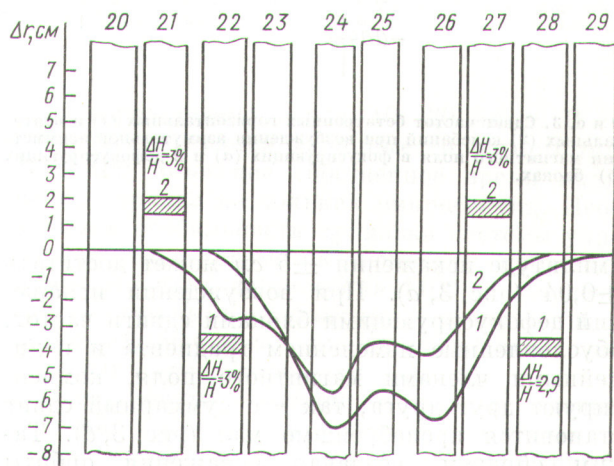
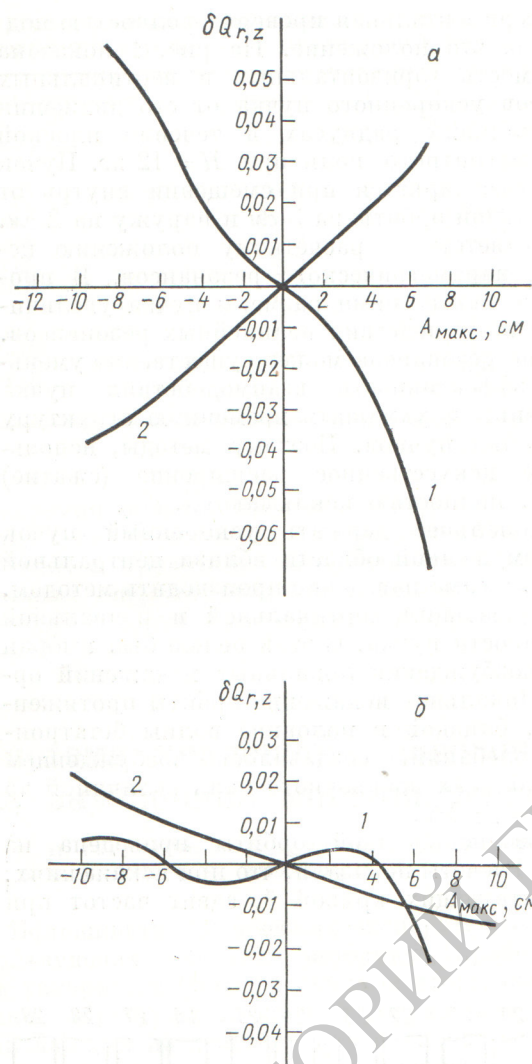


Рис. 2. Форма искаженной орбиты при возбуждении азимутальной асимметрии магнитного поля в фокусирующих (1) и дефокусирующих (2) блоках на участке ускорителя между блоками 21—29.



Р и с. 3. Сдвиг частот бетатронных горизонтальных (1) и вертикальных (2) колебаний при возбуждении азимутальной асимметрии магнитного поля в фокусирующих (а) и в дефокусирующих (б) блоках.

амплитуде искажения ± 5 см может достигать $\pm 0,04$ (рис. 3, а). При возбуждении искажений дефокусирующими блоками сдвиги частот, обусловленные изменением градиента и нелинейными членами магнитного поля, компенсируют друг друга, так что суммарный сдвиг становится пренебрежимо мал (рис. 3, б). Таким образом, создавая искажения орбиты дефокусирующими блоками, удается расширить рабочую область мишеней до ± 5 см и более.

Модуляция интенсивности выведенных пучков с частотой ВЧ-напряжения устраняется выключением ускоряющего поля в момент перехода на плоскую часть магнитного цикла. Наведение пучка на мишень начинается только после его разгруппирования. Поскольку в процессе наведения исключено действие резонансов, модуляция интенсивности во времени может вызываться только пульсациями магнитного поля. Для эффективного подавления этого явления введена обратная связь по сигналу, пропорциональному току пучка на мишень, и обеспечено быстроедействие и широкий частотный диапазон системы питания дополнительных обмоток блоков. С другой стороны, пульсации токов самой системы питания ограничены уровнем, не приводящим к заметной модуляции плотности потока частиц.

Описание системы. Ток в дополнительные обмотки магнитных блоков подается от управляемых тиристорных преобразователей, питающихся по мостовой трехфазной схеме от индукторных синхронных генераторов с частотой 4100 гц мощностью 260 ква (рис. 4). Регулирование напряжения тиристорного преобразователя осуществляется с помощью отрицательной обратной связи по сигналу от датчика тока ускоренного пучка на мишень. В качестве датчика используется сцинтилляционный монитор интенсивности вторичных частиц, рождающихся на мишени. На рис. 5 представлены структурная схема системы регулирования тока пучка на мишень и ее частотные характеристики [5]. При построении логарифмических частотных характеристик (рис. 5) были приняты следующие передаточные функции звеньев:

а) коэффициент усиления усилителя обратной связи

$$K_{\text{уос}} = \frac{U_{\text{вх}}}{U_{\text{вх}}},$$

где $U_{\text{вх}} = U_{\text{оп}} - U_{\text{мон}}$, $U_{\text{оп}}$ — опорное напряжение, $U_{\text{мон}}$ — напряжение монитора;

б) передаточная функция тиристорного преобразователя

$$K_T = \frac{U_T}{U_{\text{вх}}} = \frac{E_{\text{тп}}}{U_{\text{вх}}} \cdot \frac{1}{T_\gamma \cdot P + 1},$$

где $T_\gamma = \frac{\gamma}{4\pi \cdot f}$, γ — угол коммутации, f — частота генератора;

в) передаточная функция производной тока в нагрузке

$$K_{\text{пн}} = \frac{I_H \cdot P}{U_T} = \frac{K_H \cdot P}{T_H \cdot P + 1},$$

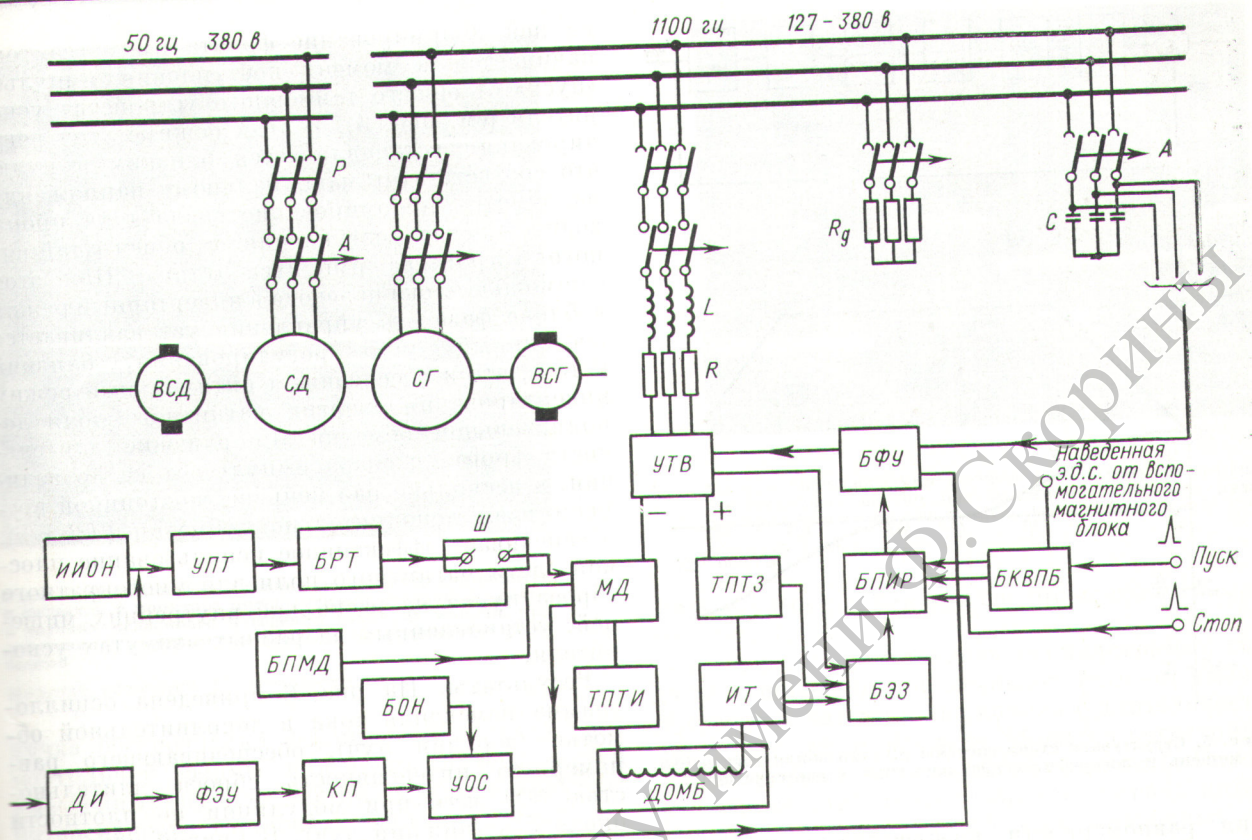


Рис. 4. Блок-схема системы питания дополнительной обмотки:

СГ — синхронный генератор; ВСГ — возбудитель синхронного генератора; СД — синхронный двигатель; ВСД — возбудитель синхронного двигателя; УТВ — управляемый тиристорный выпрямитель; ДОМБ — дополнительная обмотка магнитного поля; ДИ — датчик интенсивности вторичных частиц; ФЭУ — фотоумножитель; КП — катодный повторитель; БОН — блок опорного напряжения; УПТ — усилитель постоянного тока; УОС — усилитель обратной связи; ИИОН — импульсный источник опорного напряжения; МД — магнитный датчик тока; БПМД — блок питания магнитного датчика тока; ТПТИ — трансформатор постоянного тока для измерений; ТПТЗ — трансформатор постоянного тока для защиты; ИТ — импульсный трансформатор для защиты; БЗЗ — блок электронных защит; БФУ — блок фазового управления; БПИР — блок перевода в инверторный режим; БКВПБ — блок контроля временного положения бампа.

где I — ток нагрузки, T_n — постоянная времени нагрузки, K_n — коэффициент;

г) передаточная функция смещения пучка

$$K_o = \frac{r}{I_n},$$

где r — смещение пучка от равновесной орбиты;

д) передаточная функция монитора интенсивности

$$K_{\text{мон}} = \frac{U_{\text{мон}}}{P \cdot r}.$$

Для максимально возможного расширения частотного диапазона, определяемого частотой питающего напряжения 1100 гц, временная нестабильность формирования импульсов включения

тириستоров уменьшена до 10–20 мксек. В системе используются лавинные тиристоры типа ПТЛ-100, имеющие собственное время включения порядка нескольких микросекунд. Необходимая стабильность привязки системы управления тиристорами к моментам прохождения через нуль напряжения 1100 гц обеспечивается сетевыми фильтрами, предотвращающими заметное искажение синусоидального напряжения генераторов (см. рис. 4).

Передаточные функции отдельных звеньев и всей структурной схемы, указанные на рис. 5, обеспечивают эффективную обработку изменений сигнала обратной связи, вызванных нестабильностью плоской части магнитного поля ускорителя и гармониками пульсаций в диапазоне 25–600 гц. Это достигается благо-

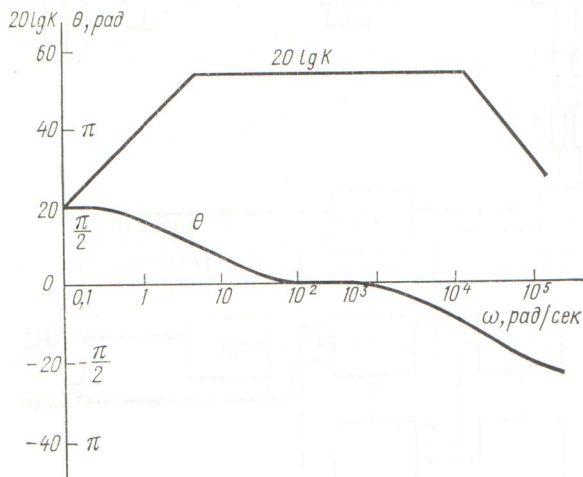
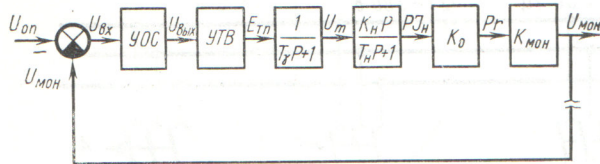


Рис. 5. Структурная схема системы регулирования тока пучка на мишень и логарифмические частотные характеристики.

даря равномерности коэффициента усиления и близкому к нулю сдвигу фаз в указанной полосе частот. Использование повышенной частоты питания (1100 гц) исключает амплитудные и фазовые искажения в отработке вентильным преобразователем изменений сигнала обратной связи на частотах пульсаций магнитного поля ускорителя.

При замене обратной связи от датчика тока пучка на обратную связь от магнитного датчика тока в дополнительной обмотке (см. рис. 4) можно формировать трапецидальные импульсы тока с плоской или наклонной вершинами импульса, которые могут быть использованы, в частности, для подвода пучка к мишени при быстром сбросе пучка на мишень, для коррекции орбиты по участкам и т. д. Стабильность вершины импульса, включая пульсации тока, составляет $\sim 0,1\%$.

На фронте и спаде импульса тока в дополнительной обмотке контур обратной связи (по току пучка или току в обмотке) не замкнут. Для уменьшения времени нарастания и спада импульса тока к обмотке прикладываются напряжения, в несколько раз превышающие активную составляющую падения напряжения

на ней. Формирование фронта импульса тока начинается в момент поступления импульса «пуск» от общего таймерного устройства ускорителя (см. рис. 4). В этом режиме угол регулирования устанавливается близким к нулю, что соответствует максимальному напряжению на обмотке. Формирование спада тока производится после поступления от общего таймерного устройства импульса «стоп». При этом с помощью блока перевода в инверторный режим в блоке фазового управления устанавливается постоянный угол регулирования, близкий к 150° , что и обеспечивает оптимальный режим инвертирования энергии магнитного поля дополнительной обмотки. Сокращение длительности фронта и спада импульса тока до величин, в несколько раз меньших постоянной времени цепи дополнительной обмотки (0,2 сек), обеспечивает эффективное использование плоской части магнитного поля для многократного сброса пучка на несколько внутренних мишеней, установленных на разных азимутах ускорителя.

Результаты. На рис. 6 приведена осциллограмма изменения тока в дополнительной обмотке (верхний луч), обеспечивающего равномерную интенсивность сброса длительностью 800 мсек при модуляции по плотности около 5% (нижний луч). В кривой изменения тока отчетливо видны составляющие с частотами 25—150 гц, отрабатывающие пульсации магнитного поля ускорителя. Большие скорости изменения тока на первой стадии сброса

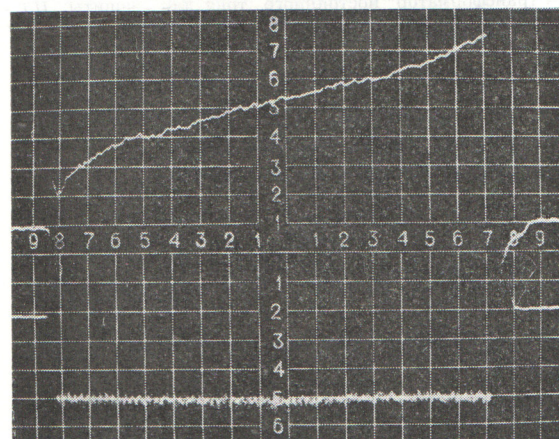
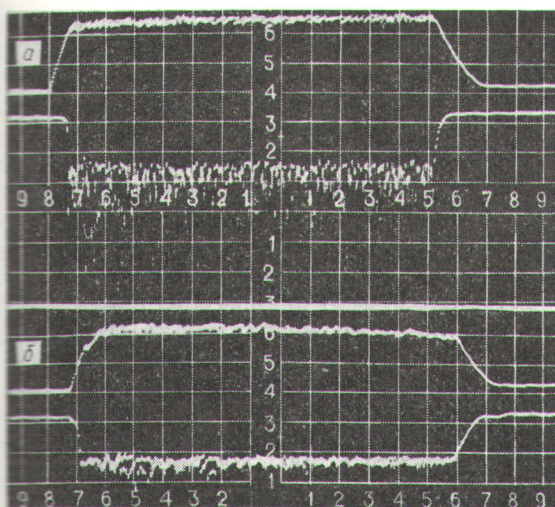


Рис. 6. Осциллограмма тока в дополнительной обмотке (верхний луч) и сигнала с монитора интенсивности вторичных частиц (нижний луч) при медленном наведении пучка на мишень.

Масштаб развертки 50 мсек/клетка.

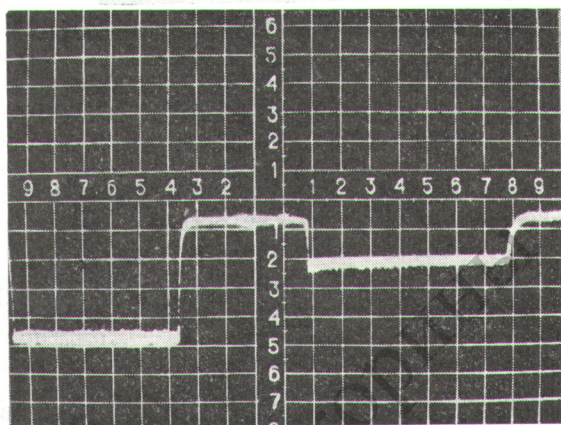


Р и с. 7. Осциллограммы токов в дополнительной обмотке и сигналов с монитора интенсивности вторичных частиц в случаях медленного наведения пучка на мишень при действии (а) и подавлении действия (б) нелинейных резонансов.

Масштаб развертки 50 мсек/клетка.

пучка обеспечивают формирование почти прямоугольной формы изменения интенсивности выведенных пучков частиц. Среднее значение интенсивности вторичных частиц на протяжении всего времени сброса пучка изменяется не более чем на несколько процентов. Время нарастания интенсивности на осциллограмме рис. 6 около 10 мсек, время спада около 30 мсек.

Ухудшение временной структуры сброса выведенного пучка, обусловленное действием нелинейных резонансов, показано на рис. 7, а. Видно, что возмущения протоинного пучка, обусловленные действием этих резонансов, приводят к модуляции плотности потока вторичных частиц до 80%. На рис. 7, б приведена осциллограмма, иллюстрирующая улучшение сброса пучка на мишень. Улучшение получено благодаря коррекции градиента поля ускорителя, смещавшей рабочую точку за пределы действия нелинейных резонансов. Остальные условия наведения пучка на мишень остава-



Р и с. 8. Осциллограмма сигнала с монитора интенсивности вторичных частиц при медленном наведении пучка последовательно на две мишени разных каналов.

Масштаб развертки 50 мсек/клетка.

лись такими же, как при снятии осциллограммы на рис. 7, а.

На рис. 8 представлена осциллограмма сигнала с монитора при последовательном выводе вторичных частиц в два канала с длительностями сброса 300 и 350 мсек. Монитор регистрировал вторичные частицы с обеих мишеней. Видно, что малые длительности фронта и спада интенсивности, равные 10—15 мсек, позволяют эффективно использовать плоскую часть магнитного поля для последовательной работы нескольких каналов вторичных частиц в одном цикле ускорения.

Поступила в Редакцию 14/IX 1970 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. С. Казанский и др. «Приборы и техника эксперимента», № 5, 19 (1962).
2. К. П. Мызников, И. Н. Яловой. Там же, № 4, 19 (1963).
3. K. Reich. Progr. in Nucl. Techniks and Instr., II, 163 (1967).
4. В. И. Гридасов, К. П. Мызников. Препринт ИФВЭ 68-60 (1968).
5. В. П. Шипило. Автоматизированный вентильный электропривод. М., «Энергия», 1969.