

1974

18  
К-14



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

---

Г.С. Казанский, А.И. Михайлов, Г.П. Пучков, А.П. Царенков

1177

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ  
РЕЖИМА УСКОРЕНИЯ  
С ОДНИМ УСКОРЯЮЩИМ ЭЛЕКТРОДОМ  
НА СИНХРОФАЗОТРОНЕ  
ЛАБОРАТОРИИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ  
ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна 1963 год

Г.С. Казанский, А.И. Михайлов, Г.П. Пучков, А.П. Царенков

1177

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ  
РЕЖИМА УСКОРЕНИЯ  
С ОДНИМ УСКОРЯЮЩИМ ЭЛЕКТРОДОМ  
НА СИНХРОФАЗОТРОНЕ  
ЛАБОРАТОРИИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ  
ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объединенный институт  
ядерных исследований  
БИБЛИОТЕКА

Дубна 1963 год

1785/2 48.



## В В Е Д Е Н И Е

Синхрофазотрон Объединенного института ядерных исследований оснащен системой высокочастотного питания, выполненной в виде двух каналов мощных широкополосных усилителей, нагруженных на резонансные контуры с низкой добротностью. Емкостью контуров служат электроды, электрическое поле которых используется для ускорения протонов.

До последнего времени необходимый уровень электрического поля в синхрофазотроне создавался двумя электродами, размещенными в диаметрально противоположных промежутках ускорителя. Таким образом за один оборот протоны приобретали энергию дважды. Соответственно фазовый сдвиг между ускоряющими напряжениями на электродах равен  $180^\circ$ .

Наличие двух ускоряющих промежутков в значительной степени ограничивало возможность размещения экспериментальной аппаратуры, так как использовался только один промежуток для вывода частиц из камеры ускорителя. Предварительные расчёты и исследования показали, что обеспечение необходимой амплитуды ускоряющего электрического поля возможно при использовании только одного электрода. В связи с переходом на режим ускорения с одним ускоряющим электродом при повышенной амплитуде ускоряющего напряжения возникла необходимость в дополнительных исследованиях синхротронного режима с точки зрения эффективности режима захвата и стабильности ускорения в течение всего рабочего цикла. Результатам этих исследований посвящена данная работа.

В работе приводятся результаты измерений частотных флуктуаций в частоте ускоряющего напряжения. Даются сведения о методике измерений. Проводится сравнительный анализ влияния переходных процессов и паразитной частотной модуляции на начало синхротронного режима при ускорении на одном и двух ускоряющих электродах. Рассмотрен режим формирования пучка ускоренных частиц при ускорении на одном электроде. Приводятся данные о влиянии на пучок резонанса радиально-фазовых колебаний с гармоникой магнитного поля 1200 гц. Описаны результаты исследования режима манипуляции амплитуды ускоряющего напряжения. В заключение дается краткое обобщение материала исследований и практические рекомендации для рабочего режима системы высокочастотного питания синхрофазотрона.

I. Исследование частотных флюктуаций ускоряющего напряжения при работе одного канала мощного усилителя в форсированном режиме

Наличие паразитных возмущений в частоте ускоряющего напряжения представляет собой опасность с точки зрения нормального захвата в синхротронный режим. Паразитная раскачка резонансной частоты ускоряющего напряжения может привести к увеличению амплитуды радиально-фазовых колебаний, что в ряде случаев вызовет потери частиц на первом этапе ускорения. Особенно опасны возмущения с частотами в диапазоне частот радиально-фазовых колебаний и выше. В первом случае могут возникнуть радиально-фазовые колебания недопустимо больших амплитуд; во втором случае возникнет "дрожание" сепаратриссы, что приведет к непрерывному выходу из синхронизма частиц на границах области устойчивости.

Проведенные в свое время исследования микроструктуры частоты ускоряющего напряжения совместно с РТИАН СССР показали, что при ускорении на двух электродах уровень девиации частоты шумового характера, пересчитанный в колебания фазы, как на одном, так и на другом электроде не превышает ( $\Theta = 0,5$  радиана ( $\Delta f = 0,125$  гц), а фоновых составляющих  $\sim 1$  радиана. Максимальная девиация частоты ускоряющего напряжения на частоте  $1130$  Кгц с частотой  $1200$  гц составляла  $\Delta f = 0,7$  гц<sup>[1]</sup>. Если учесть, что допустимая гармоническая девиация частоты на любой гармонике в диапазоне фазовых колебаний ( $800 + 2000$ ) гц составляет  $0,5$  гц, то эти возмущения уже превышают допуск. Увеличение фоновых составляющих при ускорении на одном электроде за счет форсированного режима может дать увеличение гармонической девиации



частоты, что опасно в резонансных случаях. Не исключено возрастание шумовых составляющих девиации частоты в диапазоне частот фазовых колебаний, допустимая амплитуда которых не должна превышать  $\Delta f = 4,5$  гц. Естественно, необходимо было провести дополнительные исследования синхротронного режима при работе одного электрода в форсированном режиме.

Измерения проводились с помощью встроенного блока динамического измерителя шумов, разработанного А.И.Царенковым в Лаборатории высоких энергий. Суммарное среднеквадратичное значение собственных шумов прибора в полосе частот 70 гц-2300гц составляло не более 1,5 гц. Чувствительность блока при измерении была 500 мкв/гц.

Регистрировался сигнал частотных флюктуаций соответственно на выходе задающего генератора и непосредственно на ускоряющем электроде. В данном разделении последовалась цель - выяснить, какой дополнительный вклад вносит мощный усилитель к частотным флюктуациям задающего генератора.

Кроме того произведена количественная оценка общих флюктуаций и отдельных гармонических составляющих частоты ускоряющего напряжения.

На рис. I представлены осциллограммы девиации частоты с выхода задающего генератора и ускоряющего электрода в интервале времени от начала модуляции до 0,8 сек. Снятие осциллограмм осуществлялось при помощи фотоприставки с лентопротяжным механизмом. Сравнивая эти осциллограммы, нетрудно заметить, что они отличаются друг от друга лишь в районе (500+700) мсек наличием на электроде ударного возбуждения. Низкочастотные флюктуации частоты на начальном участке обусловлены магнестрикционными явлениями феррита в задающем генераторе. Отклонения адиабати-

ческого характера в районе (200 + 300) мсек обязаны излому крутизны модуляционной характеристики генератора и, вполне естественно, отражается в характере изменения радиального положения пучка.

Известно [2], что отклонение частоты ускоряющего напряжения от заданного закона приводит к отклонению радиуса траектории движения пучка согласно выражению

$$\frac{\Delta R}{R_0} = - \frac{\Delta f}{f_0} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{n}{1-n} \cdot \frac{1}{\beta^2}\right) \left\{1 - \frac{L}{(2\pi R_0 + L)[n + \beta^2(1-n)]}\right\} (1-n)\beta^2}, \quad (I)$$

где  $\Delta R$  - отклонение радиуса траектории движения пучка от  $R_0$  ;  
 $\Delta f$  - отклонение частоты ускоряющего напряжения от заданного закона ( $f_0$ ) ;

$L$  - суммарная длина прямолинейных промежутков;

$\Pi$  - показатель спада магнитного поля;

$\beta = \frac{v}{c}$  - отношение скорости протона к скорости света.

Расчеты, произведенные по формуле (I), дают отклонения пучка в интервале ускорения (200+300) мсек от равновесного радиуса около 10 см. Как показала эксплуатация, интервал ускорения (200+300) мсек, за исключением начального участка, наиболее критичен с точки зрения настройки радиального положения пучка. Как будет показано ниже, в этом же интервале при ускорении на двух электродах близок резонанс радиально-фазовых колебаний с гармоникой магнитного поля 1800 гц.

Так как наибольшие потери интенсивности происходят на начальном этапе ускорения, то следует рассмотреть вопрос о влиянии частотных флюктуаций на этом участке. На рис. 2 представлены осциллограммы частотных отклонений на начальном участке с выхода

задающего генератора и с ускоряющего электрода с момента включения высокой частоты, который фиксирован отрицательным импульсом. Сравнивая эти осциллограммы, можно сделать вывод о том, что мощный канал усиления в начале ускорения не вносит заметных добавок в девиацию частоты ускоряющего напряжения. На осциллограммах хорошо просматривается переходной процесс, который возникает в момент начала модуляции частоты и затухает полностью через  $\sim 10$  мсек, т.е. к моменту включения высокой частоты на электродах. Далее видны низкочастотные колебания, обусловленные возникновением резонансного возбуждения феррита в результате магнитострикционных явлений. Эти колебания с частотой  $\sim 200$  гц и с амплитудой 100 гц в дальнейшем изменяются как по амплитуде, так и по частоте. Примерно к 200 мсек эти колебания исчезают и до конца ускорения не проявляются. Кроме того, сигнал содержит составляющую 600 гц, равную от пика до пика 25 гц и отражающую, в какой-то мере, эффект аппаратуры связи  $f$  и  $H$ , следящий за изменением напряженности магнитного поля. Девиация частоты ускоряющего напряжения с частотой 600 гц согласуется с непосредственными измерениями пульсаций магнитного поля (см.<sup>[3]</sup>). Таким образом, за счет следящего эффекта аппаратуры связи „ $f$ “ и „ $H$ “ заметных колебаний пучка по радиусу с этой частотой не наблюдается (см. рис. 3). На осциллограмме хорошо видны колебания центра пучка, вызванные магнитострикционным возбуждением феррита и равные 7 см от пика до пика, а также колебания с частотой фазовых колебаний. На верхнем луче показаны потери интенсивности на бетатронную мишень, расположенную на расстоянии от центра, равном  $\rho = -60$  см.



В связи с малой чувствительностью бетатронной мишени были проведены специальные измерения потерь сцинтилляционным методом при импульсном питании фотоумножителя [4]. Измерительная мишень находилась на расстоянии  $\rho = -500$  мм от центра камеры. Так как в начале ускорения происходят потери интенсивности, обусловленные процессом формирования пучка, при явном преобладании факторов, не связанных с девиацией частоты ускоряющего напряжения, то измерения потерь производились в интервале ускорения от 3 до 50 мсек. На рис. 4 представлена осциллограмма сигнала потерь с этой мишени и сигнала девиации частоты ускоряющего напряжения на генераторе. На осциллограмме хорошо просматриваются групповые потери частиц с частотой пульсаций магнитного поля 600 гц, которые усугубляются колебаниями пучка по радиусу с частотой магнитоотрицаний. Интегральные потери протонов в этом интервале ускорения составили  $\sim 2\%$  от общего уровня интенсивности ( $J = 1 \cdot 10^{10} \text{ p.u.}$ ).

Потери частиц с частотой пульсаций магнитного поля можно объяснить пульсацией равновесной фазы, что приведет при  $eV_0 = \text{const}$  к "деформациям" области устойчивости. Известно [2], что энергия, приобретаемая равновесной частицей за один оборот определяется соотношением:

$$eV_0 \cos \varphi_0 = \frac{(2\pi R_0 + L)e \cdot R_0 \cdot \dot{H}_0}{c} \cdot (1 - \Delta) \quad (2)$$

где:  $\Delta = \frac{\dot{\Phi}_0}{2\pi R_0^2 \dot{H}_0} \left(1 - \frac{L}{2\pi R_0 + L}\right);$

$\dot{\Phi}_0$  - скорость изменения магнитного потока через площадь орбиты;

$\dot{H}_0$  - скорость изменения напряженности магнитного поля;

$R_0$  - радиус равновесной орбиты;

$L$  - суммарная длина прямолинейных промежутков;

$e$  - заряд протона;

$c$  - скорость света;

Расчеты показывают, что пульсация в  $\dot{N}$  на начальном участке ускорения, равная 6% от пика до пика будет приводить к изменению площади области устойчивости в пределах  $\sim 10\%$ . При малых энергиях в результате неупругого столкновения с молекулами остаточного газа в камере, шумовой раскачки фазовых колебаний, кулоновского расталкивания и т.д. протоны могут приближаться к границам области устойчивости, хотя плотность их у краев может быть в сотни и тысячи раз меньше чем в центре. При каждом сжатии области устойчивости эти протоны оказываются за ее пределами и выбывают из ускорения. За несколько десятков периодов пульсаций такие потери могут составить цифру, сравнимую с данными измерений.

По мере роста энергии эти потери будут уменьшаться, так как уменьшается плотность частиц у границы области устойчивости, с одной стороны, за счёт затухания фазовых колебаний, а с другой стороны, за счет ослабления действия указанных выше факторов (кроме шумовой раскачки фазовых колебаний). Указанные потери могут появиться лишь в результате прохождения резонансов фазовых колебаний с гармониками магнитного поля, если пучок расширится до размеров области устойчивости.

На рис. 5 представлены осциллограммы девиации частоты ускоряющего напряжения на выходе генератора и на электроде в интервале (500+800)мсек от начала ускорения при большей чувствительности и более быстрой развертке. Анализ осциллограмм показывает, что на выходе генератора имеется девиация с частотами 50 гц, 150 гц, 600 гц, которые имеются и

в магнитном поле и которые соответственно равны, приблизительно, 10 гц, 15 гц и 10 гц (от пика до пика). Кроме этих составляющих на электроде вследствие ударного возбуждения имеется девиация с частотой 100 гц амплитуды 40 гц, а также короткие импульсы амплитуды 25 гц. Так как допуск по гармоникам в диапазоне (50 + 500) гц составляет 20 гц в начале ускорения и 200 гц в конце, то, следовательно, 100-герцовая составляющая, имеющая амплитуду 40 гц, не представляет опасности. Короткие импульсы амплитуды 25 гц, хотя и вызывают быстрые "скачки" области устойчивости, но эти "скачки", как показывают расчеты, не превосходят величины 0,5 мм.

Следует отметить еще одно важное обстоятельство. Так как полоса частот аппаратуры связи „f” и „H” ограничена (0 + 500 гц), то для гармоник поля 1200 гц и 1800 гц следящий эффект будет ослабленным, что вызовет дополнительные колебания пучка по радиусу на этих частотах. Поэтому наибольшую опасность представляет гармоника поля 1200 гц, которая, как будет показано ниже, независимо от амплитуды ускоряющего напряжения лежит в диапазоне радиально-фазовых колебаний.

Подводя итог исследованиям влияния шумовой микромодуляции на режим ускорения, можно заключить следующее:

а) высокочастотный канал по отношению к задающему генератору не вносит существенных изменений в девиацию частоты ускоряющего напряжения;

б) магнитоотрицательные возбуждения феррита в совокупности с пульсацией области устойчивости вызывают потери интенсивности на начальном участке ускорения (исключая участок формирования пучка) порядка 2% от полной интенсивности;



в) вследствие ослабленного слежения за гармоникой поля 1200 гц может возникнуть раскачка колебаний по радиусу, что представляет опасность при прохождении области резонанса с фазовыми колебаниями.

## 2. Исследование захвата в синхротронный режим при ускорении на одном из двух ускоряющих электродах.

Одним из важных параметров, обеспечивающих нормальный режим ускорения, является амплитуда высокочастотного ускоряющего напряжения  $V_0$ . Выбор того или иного значения  $V_0$  определяет, с одной стороны, условия захвата в синхротронный режим, а, с другой стороны, влияет на частоту радиально-фазовых колебаний, которая при своем изменении в ускорительном цикле может проходить значения от 600 гц до 2000 гц.

В связи с тем, что обмотка основного магнита питается от 12-фазного выпрямителя, магнитное поле будет содержать гармонические составляющие пульсаций, кратные 600 герцам. Значение магнитного поля, действующего на пучок ускоренных частиц, может быть записано, как

$$H(t) = H_0(t) + \sum_{i=1}^{\infty} h_i \sin(i\Omega t + \psi_i) \quad (3)$$

где:  $H_0(t)$  — медленная функция напряженности магнитного поля от времени;

$h_i$  — амплитуда  $i$ -той гармоники;

$\Omega = 2\pi \cdot 600$  рад/сек;

$\psi$  — фазовый сдвиг.

Таким образом, в магнитном поле могут присутствовать колебания с частотами 600, 1200 и 1800 гц, совпадающие с частотами радиально-фазовых колебаний.

На рис. 6 представлен график зависимости частоты радиально-фазовых колебаний в функции напряженности магнитного поля для различных значений амплитуды ускоряющего поля  $eV_0$ . Как видно из графика, при  $eV_0 = 9600$  эв ( $V_0 = 40$  Кв) частота фазовых колебаний проходит два резонанса с гармониками поля 1800 гц и 1200 гц, что создает опасность раскачки радиально-фазовых колебаний и выхода частиц из синхронизма. Кроме того, максимальная ширина области устойчивости при захвате в синхротронный режим, равная 2 м, превышает ширину рабочей области, равную  $(I + I,2)$  м, что также приведет к потере интенсивности при захвате. При  $eV_0 = 4800$  эв ( $V_0 = 20$  Кв), хотя максимальная ширина области устойчивости и равна 1 м, однако при дальнейшем ускорении также проходятся два резонанса частоты фазовых колебаний с гармониками поля 1200 гц и 600 гц. Таким образом, для получения оптимального захвата необходимо иметь  $V_0$  в начале порядка  $(20 + 22)$  кв, а к концу ускорительного цикла поднять  $V_0$  до  $(35 + 40)$  Кв, чтобы избежать прохождения резонанса с гармоникой поля 600 гц. Поскольку резонанс с гармоникой поля 1200 гц неминуемо проходит, то должны быть приняты соответствующие меры для предотвращения возмущения пучка за счет увеличения радиально-фазовых колебаний и возможных потерь интенсивности. Поэтому для обеспечения нормального режима ускорения осуществлялась манипуляция амплитуды ускоряющего напряжения в цикле по экспоненциальному закону с постоянной времени  $\tau = 500$  мсек от  $V_{0\text{нач}} = 22$  Кв до  $V_{0\text{кон}} = 39$  Кв. В качестве типового режима поддерживалось на каналах: I канал  $V_{0\text{нач}} = 12$  Кв,  $V_{0\text{кон}} = 21$  Кв;

II канал  $V_{0\text{нач}} = 10$  Кв,  $V_{0\text{кон}} = 18$  Кв.

На рис. 7 представлен закон изменения суммарной амплитуды ускоряющего напряжения на электродах в ускорительном цикле. На этом же графике для данного закона изменения  $V_0$  приводится характер изменения частоты радиально-фазовых колебаний. Как видно из графика, наиболее опасным участком с точки зрения потерь является прохождение частоты радиально-фазовых колебаний с гармоникой поля 1200 гц в районе 1,3 сек. Как показала длительная эксплуатация, при нормальном режиме ускорения заметных потерь частиц в районе этого резонанса не происходит. Однако, неоднократно наблюдалось, что в случае срыва высокой частоты на одном из каналов вследствие пробоев на электроде, которые возникали, как правило, в районе (0,5 + 1,5) сек, происходили монотонные потери частиц до нуля в промежутке от 1 сек до конца ускорительного цикла. Ожидается, что при ускорении на одном ускоряющем электроде амплитуда  $V_0$  в конце цикла ускорения в лучшем случае будет меньше на 30% + 40%, чем при ускорении на двух электродах. Исследование резонансных явлений в ускорителе и возможностей обхода их представит особый интерес, если учесть также ослабленный следящий эффект аппаратуры  $f$  и  $H$  за гармоникой поля 1200 гц.

Вполне естественно, что при переходе на ускорение с одним ускоряющим электродом необходимо получить, по крайней мере, тот же коэффициент захвата в синхротронный режим, что и при ускорении на двух каналах. В этом смысле наибольший интерес представляет: а) сравнение процессов формирования пучка на начальном участке синхротронного режима при ускорении на одном и двух электродах; б) сравнение характера потерь на начальном этапе ускорения и в) определение оптимального значения амплитуды ускоряющего напряжения.



Как известно [5], наибольшие изменения в пучке происходят в течение  $(2 + 3)$  периодов фазовых колебаний. Рассмотрим процесс формирования пучка при различных амплитудах ускоряющего напряжения, воспользовавшись информацией с электростатических сигнальных электродов [6]. Для сравнительной оценки процессов захвата рассмотрим два случая: а) когда работают оба канала с  $V_0 = 31$  Кв, причем в этом случае размер области устойчивости, равный  $1,5$  м, превышает ширину рабочей области; и б) когда ускорение осуществляется на одном канале с  $V_0 = 17,5$  Кв, причем в этом случае размер области устойчивости, равный  $85$  см, меньше ширины рабочей области.

На рис. 8-а и 8-б представлены осциллограммы наведенного на сигнальных электродах сигнала для указанных случаев. Масштаб времени в обоих случаях одинаков и равен  $250$  мксек/клетка. Как известно [5], высокочастотный сигнал с сигнальных электродов, пропорциональный плотности частиц в сгустке должен быть промодулирован удвоенной частотой фазовых колебаний. Измеряя периоды фазовых колебаний, по осциллограммам можно определить, что в случае а)  $f_\phi = 1980$  гц, а в случае б)  $f_\phi = 1200$  гц, что хорошо совпадает с расчетными значениями  $f_\phi$  для данных  $V_0$ . При сравнении осциллограмм хорошо видна различная форма и глубина модуляции на первом периоде фазовых колебаний. По глубине и форме модуляции можно качественно судить об изменениях, происходящих в азимутальной плотности пучка в процессе формирования. Чем глубже модуляция, тем, очевидно, большие изменения претерпевает пучок, как с точки зрения азимутальных размеров, так и с точки зрения распределения плотности частиц в сгустке. Сказанное иллюстрирует осциллограммы рис. 9 и рис. 10 для характерных точек максимума и минимума наведенного сигнала для рассматриваемых случаев. Эти точки указаны на рис. 8 стрелками. Из сравнения осциллограмм следует, что при  $V_0 = 31$  Кв

на первом периоде фазовых колебаний наведенный сигнал претерпевает значительные изменения по сравнению с ускорением при  $V_0 = 17,5$  Кв. Кроме того, если в первом случае азимутальная протяженность пучка сокращается с  $270^\circ$  до  $210^\circ$ , то во втором случае она практически не изменяется. Объясняется это тем, что в первом случае при азимутальном размере области устойчивости, равном  $230^\circ$ , и радиальном размере, равном 1,5 м, происходят потери частиц на нерабочей области, в результате которых, как показывает расчет, азимутальная протяженность пучка должна сократиться, примерно, до  $160^\circ$ . В то же время, во втором случае, поскольку область устойчивости занимает лишь часть рабочей области, при азимутальном размере, равном, приблизительно,  $180^\circ$ , азимутальная протяженность пучка изменяется незначительно. Для сравнения на рис. II приведены кривые зависимости азимутальной протяженности пучка в течение 1,5 мсек ускорения. На этом же рисунке приведены интенсивности в относительных единицах для обоих случаев. Интенсивность определялась графическим интегрированием наведенного сигнала. Чтобы исключить нестабильность интенсивности, поскольку фотографирование наведенных сигналов производилось в разных циклах, для каждой точки измерений вводился поправочный коэффициент амплитуды сигналов в соответствии с рис. 8. При этом предполагается, что в указанных точках форма наведенного сигнала не изменяется цикл от цикла, что и было на самом деле. За единицу принята интенсивность в первом максимуме амплитуды наведенного сигнала при ускорении на двух каналах с  $V_0 = 31$  Кв.

Из сравнения кривых следует, что хотя при ускорении с  $V_0 = 31$  Кв захватывается, приблизительно, на 30% больше,

чем при  $V_0 = 17,5$  Кв, однако через два периода фазовых колебаний интенсивность становится практически одинаковой. Сравнительно более резкий спад интенсивности в течение первого периода фазовых колебаний при  $V_0 = 31$  Кв обуславливает также большую глубину модуляции наведенного сигнала из-за потерь в нерабочей области. Таким образом, нет никакой необходимости устанавливать начальную амплитуду ускоряющего напряжения, превышающую значение 22 Кв, которая вполне достаточна, чтобы область устойчивости полностью перекрыла ширину рабочей области.

Так как через (2 + 3) периода фазовых колебаний независимо от изменения  $V_0$  в пределах (17,5 + 31) Кв интенсивность становится практически одинаковой, то о захвате в синхротронный режим в зависимости от  $V_0$  можно судить по измерению интенсивности в районе, например, 2 мсек от начала ускорения. Снятая экспериментально кривая зависимости интенсивности в относительных единицах в функции начальной амплитуды ускоряющего напряжения представлена на рис. 12. Из рисунка следует, что начальная амплитуда  $V_0$ , равная 17 Кв является минимально допустимой. Уменьшение амплитуды ниже 17 Кв лишь снижает эффективность захвата.

### 3. Исследование резонансных явлений при ускорении на одном и двух ускоряющих электродах в режиме манипуляции амплитуды ускоряющего напряжения

При исследовании резонансных явлений мы рассмотрим, главным образом, резонанс частоты фазовых колебаний со второй гармоникой пульсации магнитного поля 1200 гц, поскольку он обязательно



будет происходить независимо от характера изменения амплитуды ускоряющего напряжения в ускорительном цикле. Вполне очевидно, что при прохождении области резонанса имеет место раскачка радиально-фазовых колебаний, в результате чего изменяются азимутальные и радиальные размеры пучка. Чем больше амплитуда пульсаций поля и чем меньше скорость изменения частоты радиально-фазовых колебаний в области резонанса, тем сильнее раскачка этих колебаний, которая может, в итоге, привести к выходу частиц из синхронизма и потерям интенсивности. Таким образом, для уменьшения раскачки радиально-фазовых колебаний необходимо увеличить скорость изменения частоты этих колебаний в районе резонанса [2] или при помощи специальных схем фазовой коррекции подавить эти колебания (см, например, [7]).

Для исследования резонансных явлений воспользуемся информацией, получаемой с электростатистических сигнальных электродов. Как указывалось выше, в нормальном режиме при ускорении на двух высокочастотных каналах прохождение области резонанса 1200 гц не сопровождается потерями интенсивности, а происходит лишь некоторое возбуждение пучка, приводящее к увеличению азимутальной протяженности пучка и уменьшению плотности распределения частиц в сгустке. Поэтому о степени возбуждения пучка можно судить как по степени уменьшения амплитуды наведенного сигнала, так и по степени увеличения его длительности. Разумеется, что данные изменений этими двумя способами будут совпадать лишь в том случае, если при прохождении области резонанса не будет происходить резких изменений формы сигнала (раздвоение импульса, возникновение глубоких провалов в импульсе и т.д.). На рис. 13-а и 13-б

представлены осциллограммы наведенных сигналов до и после резонанса 1200 гц для случая  $V_{0\text{нач}} = 22$  Кв и  $V_{0\text{кон}} = 39$  Кв. (О характере изменения  $V_0$  и частоты фазовых колебаний в цикле можно судить по рис.7). При данном законе изменения  $V_0$  в цикле, резонанс фазовых колебаний с гармоникой поля 1200гц, как показал эксперимент, происходит в районе 1,26 сек от начала ускорения. Размеры области устойчивости в момент резонанса составляют по азимуту  $225^\circ$  и по радиусу 9 см. Из осциллограмм рис. 13 следует, что перед резонансом азимутальный размер пучка составляет, приблизительно,  $155^\circ$ , что соответствует максимальной энергетической ширине пучка, равной 7 см. Как видно из рис. 13-б, после прохождения резонанса пучок расширяется по азимуту до  $210^\circ$ , что соответствует максимальной энергетической ширине, равной 8,5 см. Поскольку после прохождения резонанса пучок не расширяется за пределы области устойчивости, постольку мы не наблюдаем потерь интенсивности. Сравнивая результаты измерений для этих осциллограмм, можно заключить, что в результате прохождения области резонанса фазовых колебаний с гармоникой поля 1200 гц. пучок расширяется по азимуту на  $\sim 35\%$  и по радиусу  $\sim 20\%$ . На рис. 13-в представлена осциллограмма наведенных сигналов после быстрого прохождения резонанса, о чем будет сказано несколько ниже. Как видно из осциллограммы, в этом случае пучок практически не расширяется как по азимуту, так и по радиусу.

На рис.14 представлена осциллограмма изменения амплитуды наведенного сигнала в цикле ускорения для этого же случая. Резкое уменьшение амплитуды наведенного сигнала в начале ускорения соответствует потерям интенсивности. Незначительное уменьшение амплитуды сигнала перед концом ускорения обусловлено потерями частиц

с большими амплитудами свободных колебаний на мишени, которая в этот момент становилась в рабочее положение. Уменьшение амплитуды сигнала до нуля в конце ускорения соответствует медленному выводу пучка на эту мишень. Нас будет интересовать, главным образом, уменьшение амплитуды наведенного сигнала, приблизительно, в середине ускорительного цикла, которое соответствует прохождению области резонанса. Непосредственное измерение по осциллограмме показывает, что в результате прохождения резонанса 1200 гц амплитуда наведенного сигнала уменьшается на  $\sim 35\%$ , что совпадает с данными измерений степени увеличения азимутальной протяженности пучка. Поэтому, в дальнейшем мы будем оценивать расширение пучка, вызываемое резонансом, по степени уменьшения амплитуды наведенного сигнала, поскольку этот способ более простой и наглядный. Менее яркими кривыми на этой осциллограмме показано изменение  $V_0$  на I и II каналах.

Измеряя промежуток времени, в течение которого амплитуда наведенного сигнала уменьшается от своего значения перед резонансом до значения после резонанса, можно оценить ширину области резонанса, которая составляет для данного случая 250 мсек. В масштабе частоты радиально-фазовых колебаний ширина резонансной кривой заключена в пределах  $\pm 50$  гц.

Рассмотрим теперь вопрос о возможности предотвращения расширения пучка при быстром прохождении области резонанса посредством резкого уменьшения амплитуды ускоряющего напряжения. Для быстрого прохождения резонанса существенное значение имеют: а) выбор момента времени начала манипуляции  $V_0$ ; б) степень уменьшения  $V_0$  и в) крутизна переднего и заднего фронтов при изменении  $V_0$ .



Очевидно, что манипуляция  $V_0$  должна начинаться раньше, чем частота фазовых колебаний достигнет значения, равного  $f_{\text{рез}} + \frac{\Delta F}{2}$ , где  $f_{\text{рез}}$  - резонансное значение частоты фазовых колебаний;  $\Delta F$  - ширина резонансной кривой, равная для данного случая 100 гц. Как показал эксперимент, крутизна переднего фронта манипуляции не критична в пределах (500 + 5000) Кв/сек. Степень уменьшения амплитуды  $V_0$ , или глубина манипуляции, определяется двумя факторами: с одной стороны, чем дальше от резонанса начинается процесс манипуляции  $V_0$ , тем больше должен быть перепад в амплитуде ускоряющего напряжения, а с другой стороны,  $V_0$  нельзя уменьшать до значения, при котором область устойчивости сокращается до размеров пучка, в результате чего могут возникнуть потери интенсивности. Крутизна заднего фронта манипуляции является критичной в том отношении, что при заданных начале и глубине манипуляции частота фазовых колебаний может достичь при своем изменении после прохождения резонанса значения, равного  $f_{\text{рез}} - \frac{\Delta F}{2}$ . При соблюдении указанных условий резонанс будет достаточно быстро пройден и заметного расширения пучка не произойдет. На рис. 15 для сравнения представлена осциллограмма изменения амплитуды наведенного сигнала при естественном прохождении резонанса 1200 гц (более яркая кривая) и при быстром прохождении резонанса.

С практической точки зрения для каждого частного случая можно выбрать один раз установленные оптимальные значения глубины манипуляции  $V_0$  и крутизны заднего фронта. В этом случае определяющим фактором будет выбор момента начала манипуляции амплитуды ускоряющего напряжения.

На рис.16 представлен характер изменения амплитуды ускоряющего напряжения в цикле при быстром прохождении резонанса 1200 гц и частоты фазовых колебаний при ускорении на двух ускоряющих электродах. Глубина манипуляции амплитуды  $V_0$  перед резонансом равна 11 Кв. Крутизна переднего фронта  $\sim 1000 \frac{\text{Кв}}{\text{сек}}$ , начальная крутизна заднего фронта  $\sim 15 \frac{\text{Кв}}{\text{сек}}$ . Осциллограмма рис.17 иллюстрирует характер изменения  $V_0$  на одном из электродов для данного случая и характер изменения амплитуды наведенного сигнала. Как видно из осциллограммы, расширение пучка по азимуту не превышает  $\sim 5\%$ . Амплитуда  $V_0$  при манипуляции уменьшается до 23 Кв, чему соответствует азимутальный размер области устойчивости, равный  $200^\circ$ . Поскольку пучок перед резонансом имеет азимутальную протяженность  $160^\circ$ , то потерь частиц не наблюдается.

Для принятых значений крутизны заднего фронта и глубины манипуляции имеет смысл рассмотреть вопрос о критичности настройки момента начала манипуляции. Об этом необходимо знать с той точки зрения, что импульс, запускающий схему манипуляции перед резонансом, связан с напряженностью магнитного поля, а положение резонанса может смещаться по полю в зависимости от амплитуды ускоряющего напряжения, которая, вообще говоря, может меняться в зависимости от настройки или в результате нестабильности. Зависимость относительного расширения пучка  $\delta\%$  в функции момента начала манипуляции  $V_0$  перед резонансом, снятая экспериментально, иллюстрируется кривой рис.18. Как видно из рисунка, область расширения пучка по азимуту в пределах  $5\%$  заключена в диапазоне 300 мсек. Иными словами, при оптимальной настройке режима быстрого прохождения резонанса расширение пучка по азимуту не превысит  $5\%$  при изменении  $V_0$  в пределах  $\pm 10\%$ .

Естественно, что все сказанное выше, относящееся к режиму быстрого прохождения резонанса при работе на двух ускоряющих электродах, в равной мере, относится и к ускорению на одном электроде. Разница заключается лишь в том, что при ускорении на одном электроде амплитуда ускоряющего напряжения несколько меньше, и резонанс фазовых колебаний с гармоникой поля 1200гц смещается вниз по полю в район (800+900) мсек от начала ускорения. График рис.19 иллюстрирует изменение  $V_0$  в цикле и частоты фазовых колебаний при ускорении на одном электроде в режиме быстрого прохождения резонанса. Разница состоит также в том, что в случае ускорения на двух каналах частота фазовых колебаний может вплотную подходить к значению 1800 гц в районе 300 мсек, вследствие чего происходит некоторое возбуждение пучка. В то же время, при ускорении на одном канале максимальное значение частоты фазовых колебаний равно  $\sim 1550$  гц, и возбуждения пучка в этом интервале не происходит. На рис.20 представлена осциллограмма изменения амплитуды наведенного сигнала в цикле при ускорении на одном канале. Степень расширения пучка, приблизительно, такая же, что и при ускорении на двух каналах, хотя скорость изменения частоты фазовых колебаний в районе резонанса несколько больше. Сравнивая осциллограммы рис.20 и рис. 15 и 17, можно заметить, что в случае ускорения на двух каналах в районе 300 мсек наблюдается незначительное уменьшение амплитуды наведенного сигнала, соответствующее расширению пучка по азимуту, примерно, на (5+6)%.

Таким образом, с точки зрения резонансных явлений ускорение на одном канале несущественно отличается от ускорения на двух каналах. Возникающие потери интенсивности при прохождении



резонанса фазовых колебаний с гармоникой поля 1200 гц можно устранить манипуляцией амплитуды ускоряющего напряжения и тем самым предотвратить раскачку радиально-фазовых колебаний.

#### 4. Манипуляция амплитуды высокочастотного ускоряющего напряжения в ускорительном цикле

При ускорении на одном электроде определенное значение приобретает выбор амплитуды ускоряющего напряжения в конце ускорительного цикла. С одной стороны, она должна быть не меньше (23 +24) Кв в связи с опасностью приближения к резонансу с гармоникой поля 600 гц. С другой стороны, для данной конструкции ускоряющих электродов и существующего вакуума в камере в районе этих электродов амплитуда ускоряющего напряжения, равная (32+33) Кв, является предельно допустимой, превышение которой приводит к возникновению пробоев.

Для сравнительной оценки было осуществлено ускорение на двух каналах с манипуляцией  $V_0$  в цикле от  $V_{0\text{нач}} = 22$  Кв до  $V_{0\text{кон}} = 42$  Кв и, затем, на одном канале с манипуляцией  $V_0$  от  $V_{0\text{нач}} = 17,5$  Кв до  $V_{0\text{кон}} = 28,5$  Кв. В обоих случаях интенсивность на энергии 10 Бэв была одинаковой и равнялась  $1,2 \cdot 10^{10}$ . Таким образом, для оптимального режима ускорения желательно устанавливать амплитуду ускоряющего напряжения в конце ускорительного цикла в пределах (27+30) Кв.

Одним из методов медленного вывода пучка на мишень является метод манипуляции амплитуды ускоряющего напряжения ( см. напр. [8] ). Для получения равномерного и полного вывода пучка на мишень необходимо, с одной стороны, программировать характер спада  $V_0$ , а с другой стороны, снизить  $V_0$  до опреде-

ленного минимального уровня, при котором исчезает область устойчивости. В нашем случае минимальной амплитудой ускоряющего напряжения является  $V_0 = 9,7$  Кв. Как показали эксперименты, достаточно снизить  $V_0$  до  $(I_2 + I_3)$  Кв, чтобы с точностью до чувствительности сигнальных электродов ( $10^6 \frac{\text{протонов}}{\text{импульс}}$ ) получить полный вывод пучка на мишень. Таким образом, для медленного вывода пучка на мишень необходимо в течение заданного интервала времени снизить определенным образом амплитуду ускоряющего напряжения от  $(27+30)$  Кв до  $(I_2+I_3)$  Кв.

Манипуляция амплитуды ускоряющего напряжения осуществляется "блоком манипуляции  $V_0$ ", выходное напряжение которого ( $U_{\text{ман}}$ ) программирует опорный уровень системы АРУ высокочастотного усилительного тракта. Для пояснения на рис.21 представлены диаграммы изменения в цикле напряжения на выходе " блока манипуляции  $V_0$ " и суммарной амплитуды ускоряющего напряжения на электродах. Как видно из диаграммы, недостатком данной схемы манипуляции является невозможность уменьшения  $V$  ниже начального уровня при  $U_{\text{ман}} = 0$ . Особенности схемы АРУ не позволяли снизить  $V_0$  меньше  $V_{0\text{нач}}$ , хотя  $U_{\text{ман}}$  при своем изменении становилось отрицательным. Поэтому для полного вывода пучка на мишень при работе на двух ускоряющих электродах, необходимо было в определенный момент времени выключать один из каналов. Правда, при этом возникала некоторая неравномерность вывода, но, как показали эксперименты, она была несущественной.

При переходе на ускорение с одним ускоряющим электродом встала необходимость изменить схему манипуляции таким образом, чтобы при  $V_{0\text{нач}} = (I_7+22)$  Кв иметь возможность снижать  $V$  до уровня  $(I_2+I_3)$  Кв. Эта задача была решена внесением некоторых

изменений в схему АРУ. На рис.22 представлены диаграммы манипулирующего напряжения  $U_{ман}$  и амплитуды ускоряющего напряжения в цикле для одного канала по новой схеме манипуляции. Сравнивая диаграммы рис.21 и рис.22, можно заключить, что новая схема манипуляции существенно эффективнее старой. Так, например, при изменении манипулирующего напряжения в пределах (0+200) в  $V_0$  на одном канале меняется по старой схеме в 1,3 раза, а по новой в 1,7 раза. При манипуляции для медленного вывода пучка  $V_0$  меняется по старой схеме также в 1,3 раза, а по новой в 2,3 раза.

Таким образом, новая схема манипуляции амплитуды ускоряющего напряжения удовлетворяет всем требованиям с точки зрения изменения  $V_0$  в цикле для нормального ускорения и медленного вывода пучка на мишень.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенных исследований режима ускорения пучка протонов при наличии одного ускоряющего электрода позволяют сделать следующие выводы:

I. Форсирование режима мощного широкополосного усилителя при работе на один электрод не вносит дополнительно существенных паразитных возмущений гармонического и шумового характера в частоту ускоряющего напряжения. Эффект неполного "слежения" частоты ускоряющего напряжения за гармониками магнитного поля приводит к радиальным колебаниям пучка, что представляет опасность в резонансных случаях.



2. Исследование режима формирования пучка в начале ускорения показало, что для обеспечения нормального захвата в синхротронный режим и ускорения с минимальными потерями необходим оптимальный выбор амплитуды ускоряющего напряжения  $V_0$  и характера ее изменения в цикле ускорения.

3. Исследование резонансов показало, что при ускорении на двух электродах резонанс с гармоникой магнитного поля 1800 гц проявляется слабо и не приводит к существенным изменениям структуры пучка. Прохождение резонанса с гармоникой поля 1200 гц связано с возбуждением пучка, что может вызвать потери частиц. В связи с этим рассмотрен режим манипуляции амплитуды ускоряющего напряжения, обеспечивающий быстрое прохождение резонанса фазовых колебаний с гармоникой поля 1200 гц, что обуславливает слабое возбуждение пучка.

4. Рассмотрен режим манипуляции амплитуды ускоряющего напряжения при ускорении на одном электроде. Этот режим обеспечивает нормальное ускорение в цикле и длительный вывод вторичных частиц для физического эксперимента. В связи с этим выбрана схема программирования опорного уровня АРУ широкополосного усилителя.

Результаты данной работы могут быть использованы для оперативной настройки оптимального режима системы высокочастотного питания синхрофазотрона.

Авторы пользуются случаем выразить благодарность сотрудникам РТО ЛВЭ Перфееву В.Н., Бокову Г.А., Штырляеву А.А., Голембевскому В.Ф., Юрову С.Н., Старикову Ю.М., Слесареву В.З. и Дранищевой Е.Д. за непосредственное участие в проведении экспериментов.

## Л И Т Е Р А Т У Р А :

1. Ф.А.Водопьянов "Задающий генератор в системе связи частоты ускоряющего поля и напряженности магнитного поля синхрофазотрона на IO Бэв . Радиотехника и электроника, 1956, I, 7, 928-939.
2. М.С.Рабинович " Основы теории синхрофазотрона" Труды ФИАН СССР т.Х 1958.
3. Г.С.Казанский, В.Н.Перфеев, К.В.Чехлов " Некоторые данные по магнитным измерениям на синхрофазотроне на IO Бэв".  
Препринт ОИЯИ, Р-652, 1961, г.Дубна.
4. Л.П.Зиновьев, И.Б.Иссинский, К.П.Мызников " Сцинтилляционный метод наблюдения за пучком в синхрофазотроне на IO Бэв".  
Препринт ОИЯИ 557, 1961, Дубна.
5. Г.С.Казанский, А.Б.Кузнецов, А.И.Михайлов, Н.Б.Рубин, А.П.Царенков " Поведение пучка протонов в синхрофазотроне на начальном этапе ускорения". Препринт ОИЯИ, Р-670, 1962, Дубна.
6. Ф.А.Водопьянов, А.А.Кузьмин, С.М.Рубчинский, В.А.Уваров  
PROCEEDINGS OF THE INTERN. CONF. OF HIGH ENERGY  
ACCELAR. AND INSTR.  
CERN, GENEVA, 1959, p 470-477
7. EDWIN I. ROGERS: "METHOD FOR DAMPING PHASE OSCILLATIONS  
IN A SYNCHROTRON".  
REV. SCI. INSTR. 1958 v29 n3 p215
8. Г.С.Казанский, А.И.Михайлов, А.П.Царенков " Методы получения длительного и короткого вывода вторичных частиц на синхрофазотроне ЛВЭ ОИЯИ". Препринт ОИЯИ Б50-819, 1961, Дубна.

Рукопись поступила в издательский отдел  
15 января 1963 года.

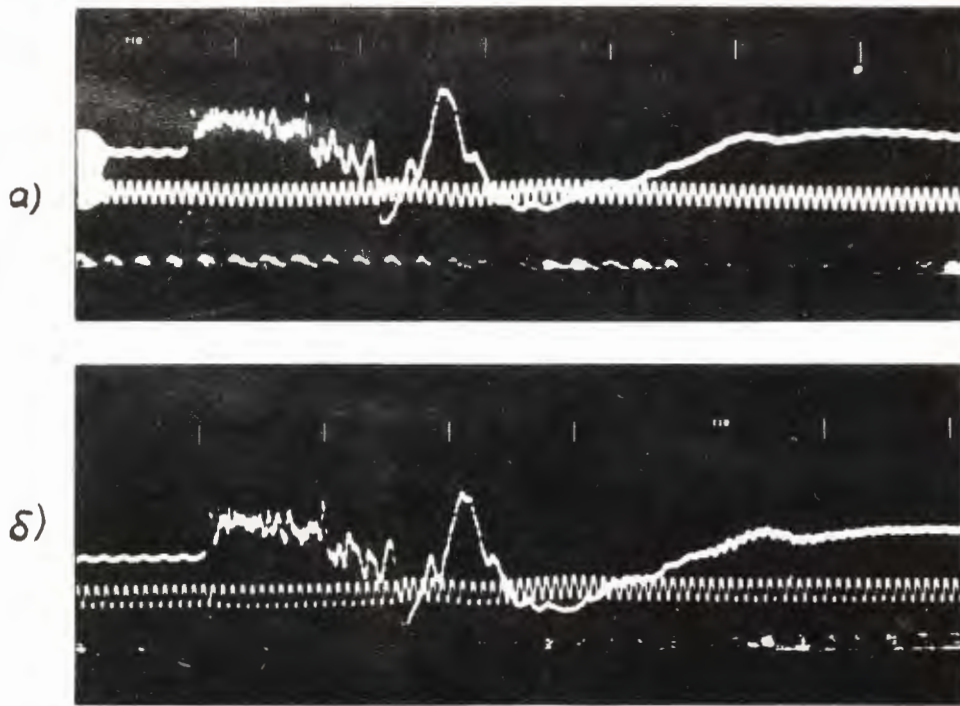


Рис.1. Девиация частоты ускоряющего напряжения:  
 а) на выходе задающего генератора;  
 б) на ускоряющем электроде.  
 На нижнем луче калибровочная частота 100 гц.  
 Амплитуда от пика до пика 250 гц.

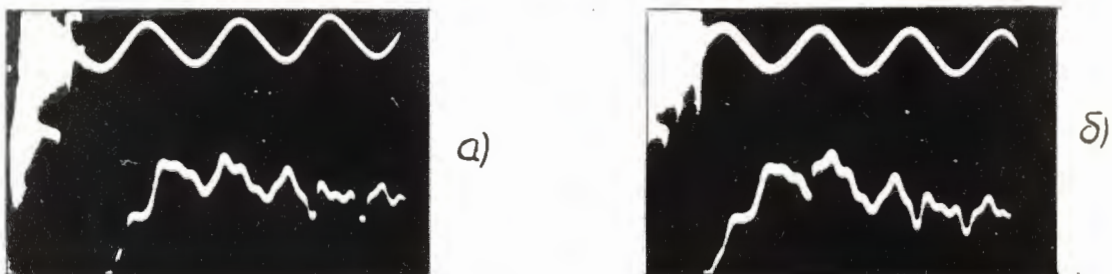


Рис.2. Переходной процесс и девиация частоты ускоряющего напряжения в начале ускорения:  
 а) на выходе задающего генератора;  
 б) на электроде.  
 Период калибровочной частоты  $T_k = 10$  мсек,  
 амплитуда 250 гц.



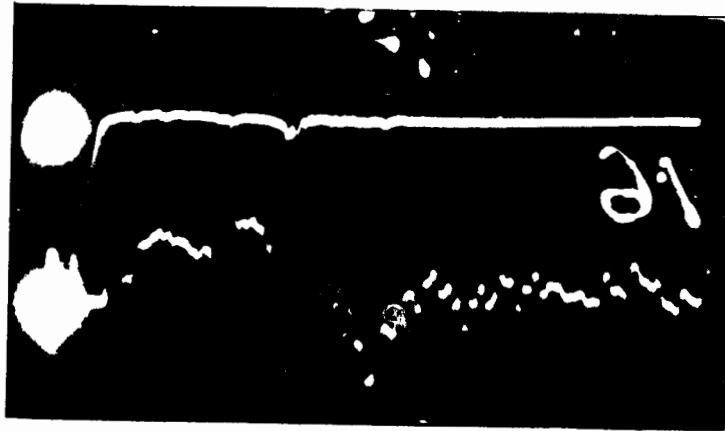


Рис.3. Радиальные колебания центра заряда пучка ускоренных частиц ( нижний луч) и потери частиц на бетатронную мишень.

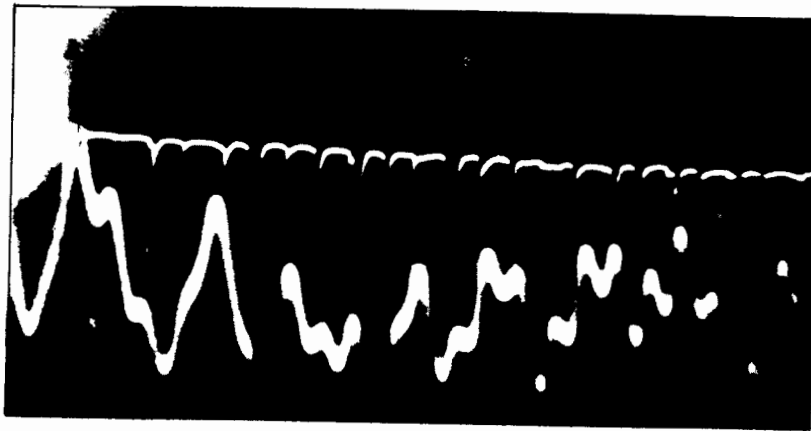


Рис.4. Девияция частоты ускоряющего напряжения с выхода задающего генератора ( нижний луч) и потери частиц на измерительную мишень.

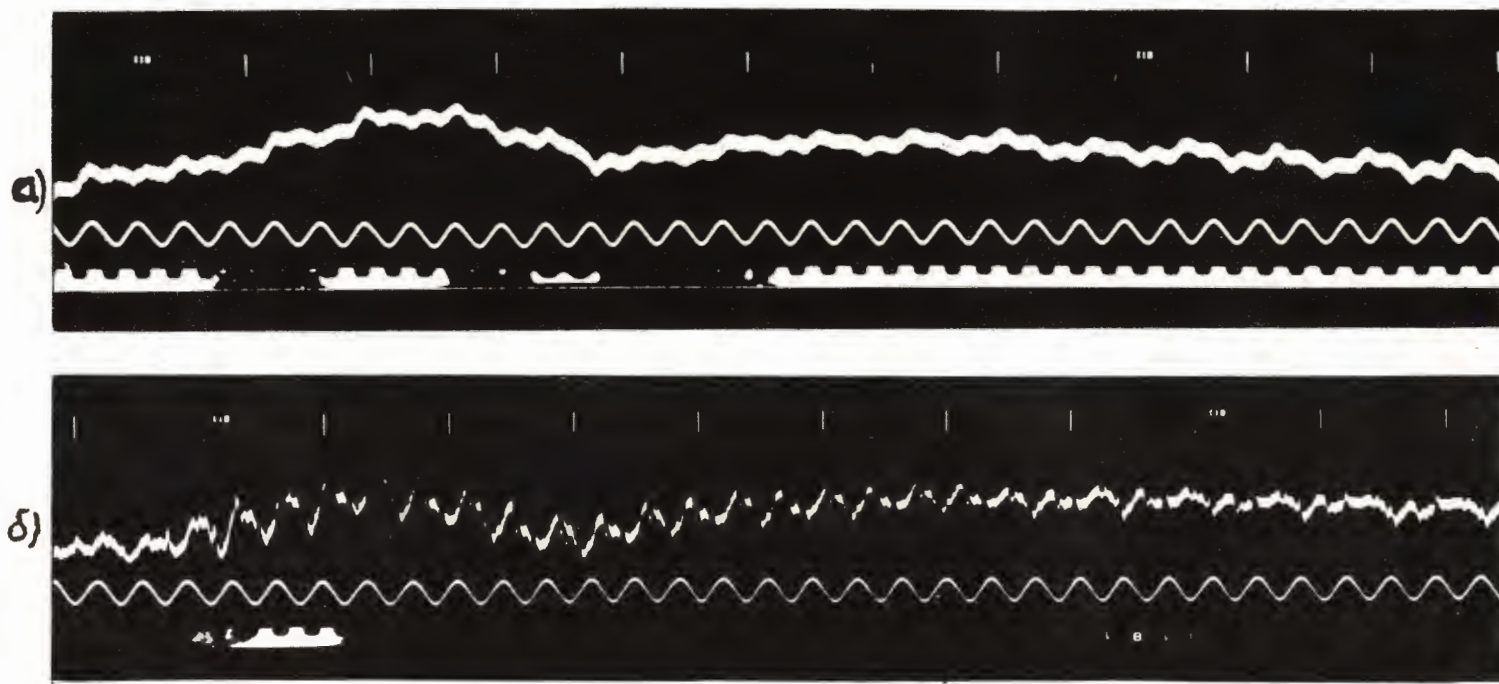


Рис.5. Девиация частоты ускоряющего напряжения:  
а) на выходе задающего генератора ;  
б) на электроде .  
Калибровочная частота 100 гц, амплитуда 25 гц.

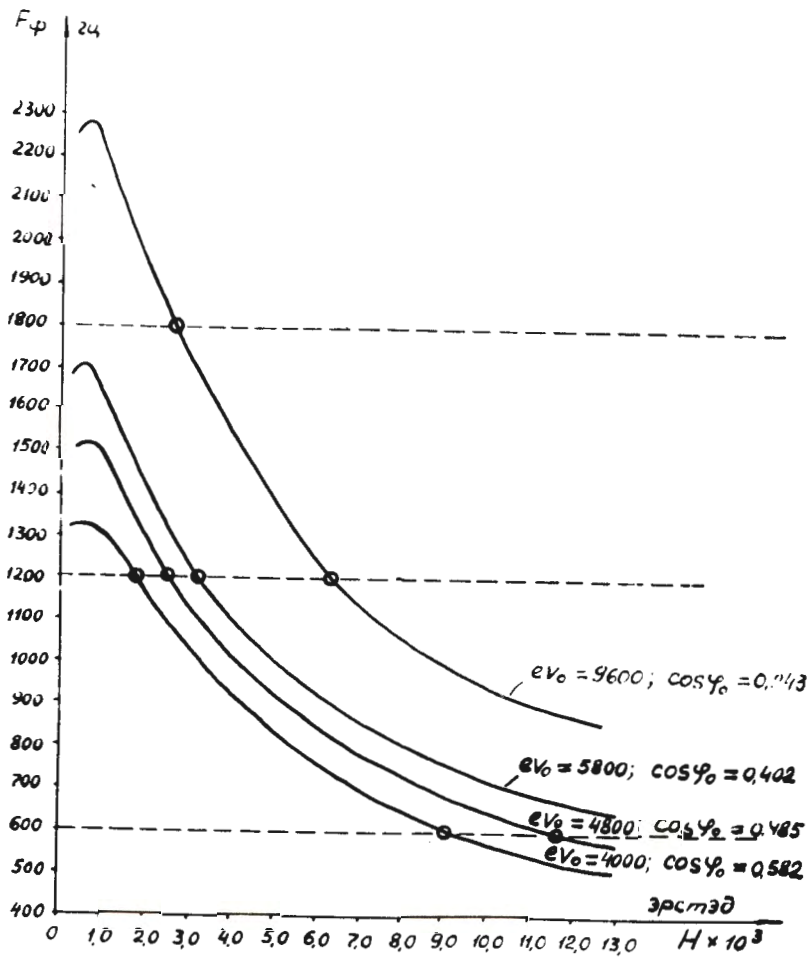


Рис.6. График зависимости частоты радиально-фазовых колебаний в функции напряженности магнитного поля при разных значениях амплитуды ускоряющего поля  $eV_0$ .

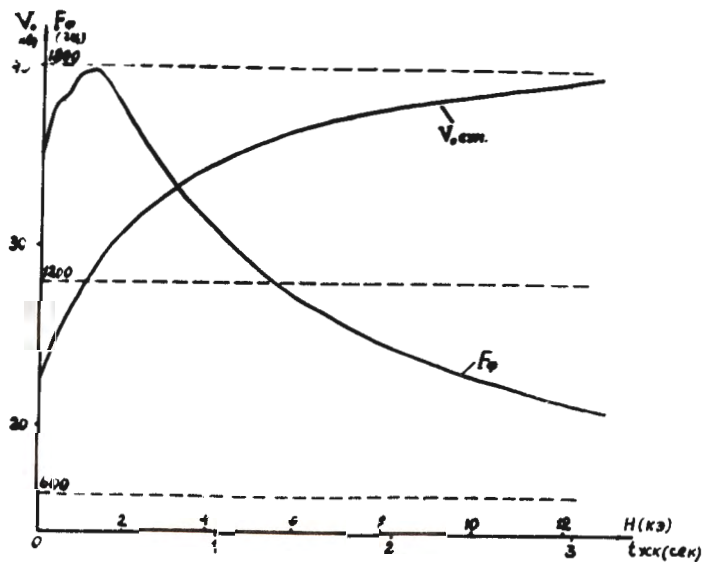


Рис.7. График зависимости частоты фазовых колебаний в функции напряженности магнитного поля в режиме манипуляции амплитуды ускоряющего напряжения.



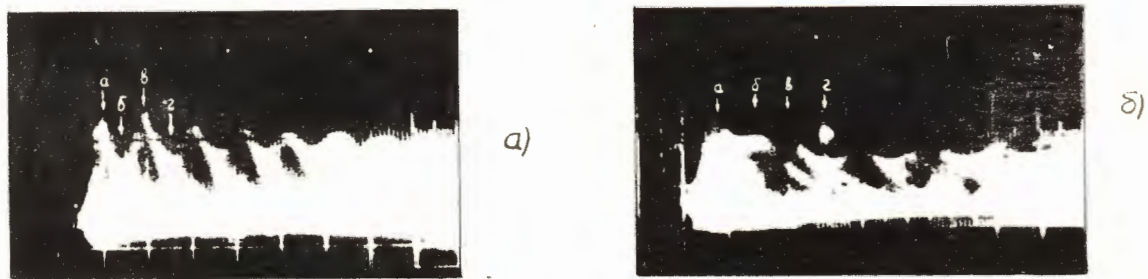


Рис.8. Сигнал с вертикальных сигнальных электродов в начале ускорения:

- а) при ускорении на двух электродах с суммарной амплитудой  $V_{\text{онач}} = 31$  Кв;  
 б) при ускорении на одном электроде  $V_{\text{онач}} = 17,5$  Кв.  
 I клетка калибровочной сетки - 250 мксек.

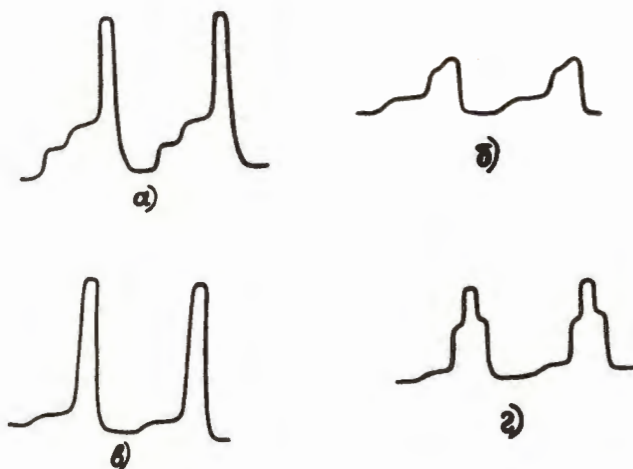


Рис.9. Сигнал с вертикальных сигнальных электродов. Азимутальное распределение плотности частиц в сгустке в момент формирования при  $V_{\text{онач}} = 31$  Кв:  
 а, б - соответствует точкам максимума модуляции амплитуды высокочастотного сигнала;  
 б, з - соответствует точкам минимума.

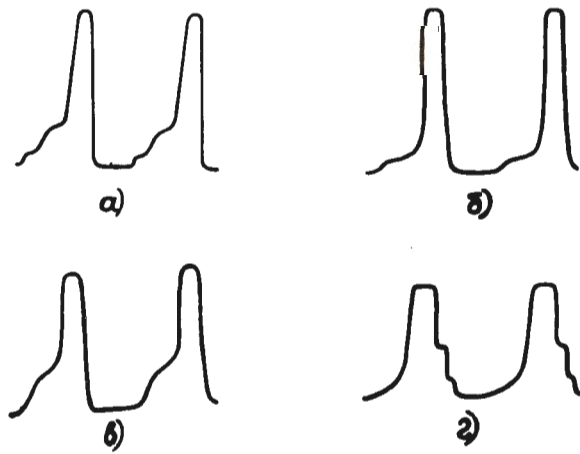


Рис.10. Сигнал с вертикальных сигнальных электродов. Азимутальное распределение плотности частиц в сгустке в момент формирования при  $V_{0\text{нач}} = 17,5$  Кв: а, б - соответствуют точкам максимума модуляции амплитуды высокочастотного сигнала; в, г - соответствует точкам минимума.

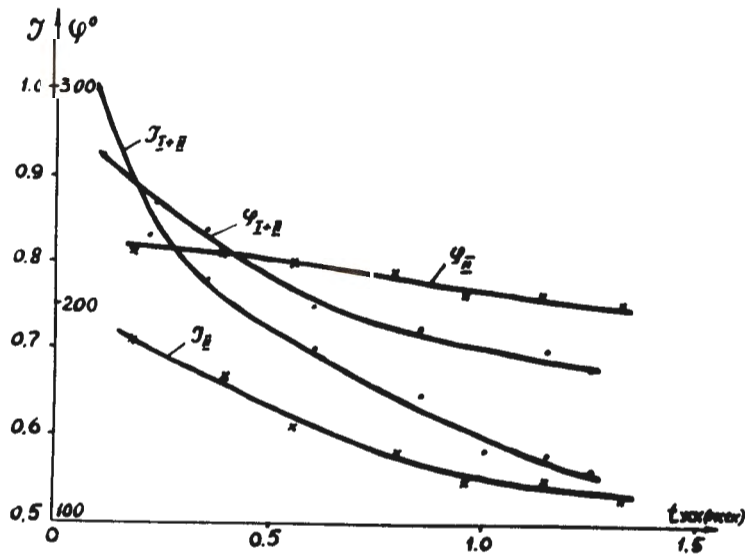


Рис.11. График изменения интенсивности ( $J$ ) и азимутальной протяженности сгустка ускоренных частиц ( $\psi^\circ$ ) в функции времени ускорения:

- 1)  $J_{I+II}$ ;  $\psi_{I+II}$  при  $V_{0\text{нач}} = 31$  кв;  
 2)  $J_{II}$ ;  $\psi_{II}$  при  $V_{0\text{нач}} = 17,5$  кв.

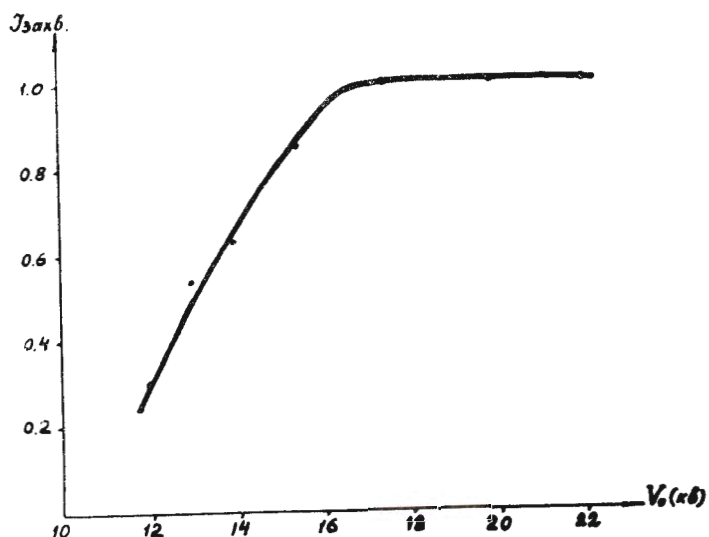


Рис.12. Экспериментальная кривая зависимости эффективности захвата от начальной амплитуды ускоряющего напряжения.



а)



б)



в)

Рис.13. Форма импульсов, регистрируемых вертикальными сигнальными электродами при прохождении области резонанса радиально-фазовых колебаний с гармоникой магнитного поля 1200 гц:

- а) до резонанса ;
- б) после резонанса ;
- в) после резонанса при быстром его прохождении.





Рис.14. Характер изменения амплитуды наведенного сигнала в цикле ускорения и амплитуды ускоряющего напряжения на обоих каналах.



Рис.15. Изменение амплитуды наведенного сигнала при обычном и быстром прохождении резонанса с гармоникой поля 1200 гц ( менее яркая кривая).

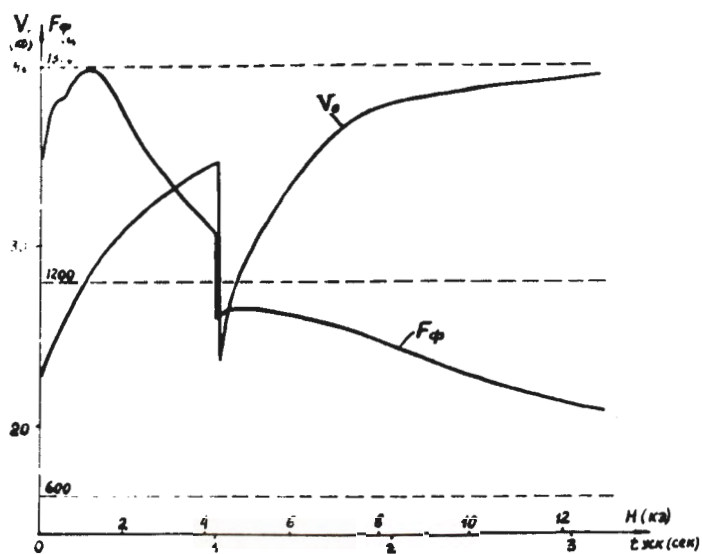


Рис.16. График изменения частоты фазовых колебаний  $F_{\phi}$  в функции напряженности магнитного поля при манипуляции амплитуды ускоряющего напряжения  $V_0$  в режиме быстрого прохождения резонанса.



Рис.17. Характер изменения амплитуды ускоряющего напряжения и амплитуды наведенного сигнала при быстром прохождении резонанса фазовых колебаний с гармоникой поля 1200 гц.

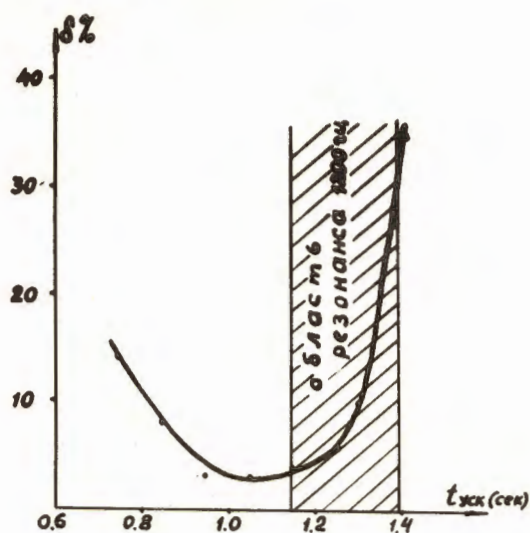


Рис.18. Экспериментальная кривая зависимости относительного расширения пучка ускоренных частиц в функции момента начала манипуляции  $V_0$  перед резонансом фазовых колебаний.

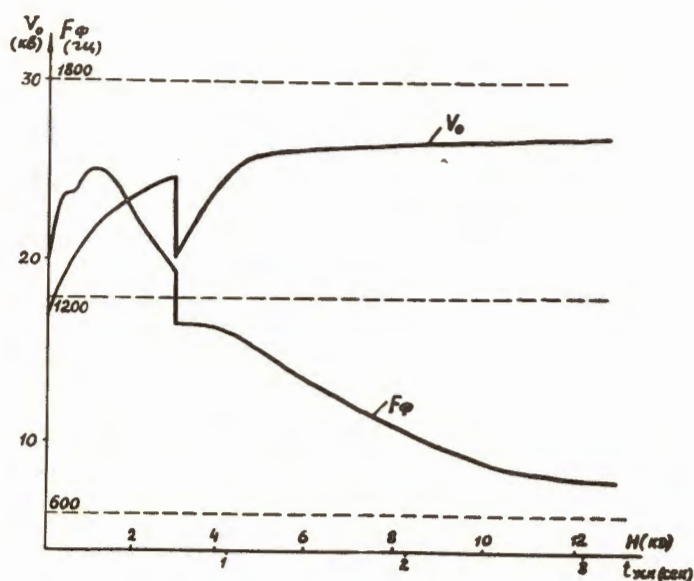


Рис.19. График изменения частоты фазовых колебаний  $F_\phi$  в функции напряженности магнитного поля при манипуляции  $V_0$  в режиме быстрого прохождения резонанса. Ускорение на одном электроде.



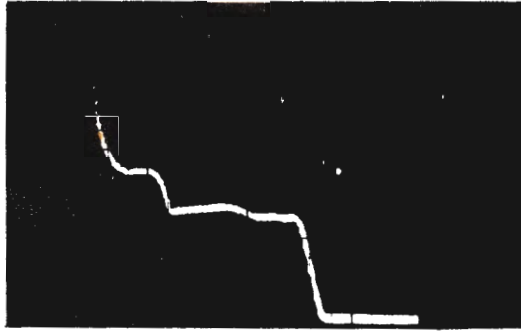


Рис.20. Амплитуда наведенного сигнала при ускорении на одном канале при обычном прохождении резонанса 1200гц.

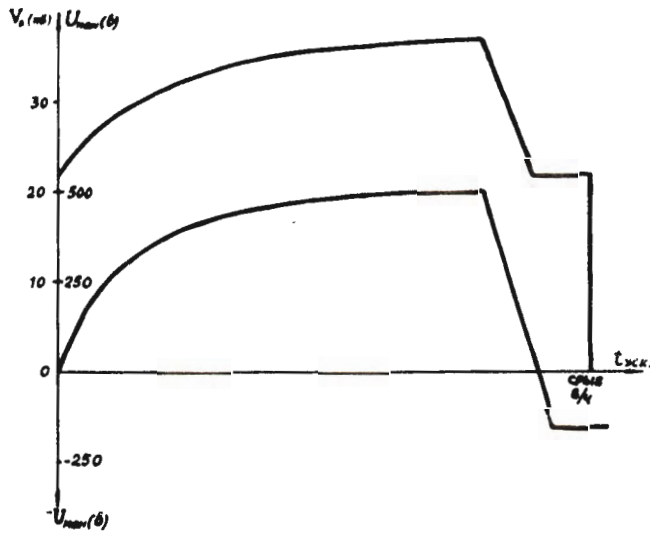


Рис.21. Потенциальная диаграмма суммарной амплитуды ускоряющего напряжения и манипулирующего напряжения ( нижняя кривая) в цикле ускорения.

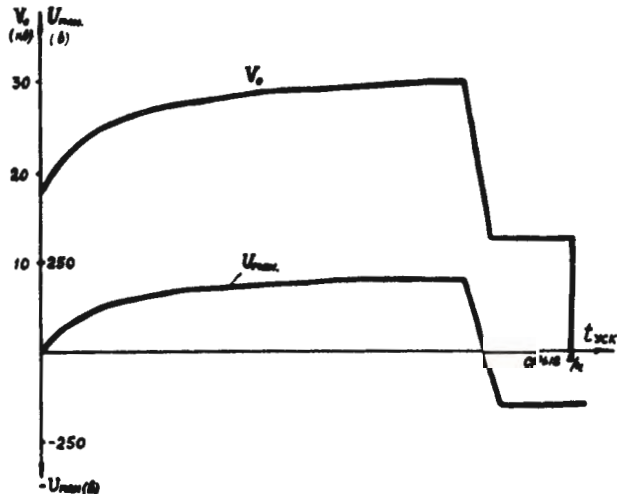


Рис.22. Потенциальная диаграмма амплитуды ускоряющего напряжения и манипулирующего напряжения ( нижняя кривая) в цикле ускорения при ускорении на одном электроде.