

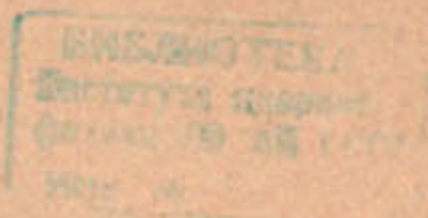
П. 33

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ АН СССР.

препринт

Е.А.Пирушкин, Т.П.Стародубцева

**Прибор для измерения параметров когерентных
радиально-фазовых колебаний в накопителях
установок со встречными пучками**



НОВОСИБИРСК 1965

Описан метод наблюдения радиально-фазовых колебаний сгустка в накопителях путем анализа гармонических составляющих сигнала с электростатического пикап-электрода. Измерительная аппаратура описана на примере прибора для накопителя ВЭП-2 (встречные электрон-позитронные пучки, частота обращения 25 Мгц). Прибор позволяет измерять частоту радиально-фазовых колебаний в диапазоне 20-200 кгц и девиацию частоты 0,5 кгц и выше, начиная с токов в $I_{ма}$, а также глубину и частоту амплитудной модуляции первой и шестой гармоник сигнала на пикап-электроде.

Наличие сигнала, наводимого электронным сгустком на резонатор, может привести к тому, что, начиная с некоторых токов, система пучок-резонатор может оказаться неустойчивой к возникновению когерентных радиально-фазовых колебаний сгустка /1,2/.

При наличии когерентных радиально-фазовых колебаний каждая гармоника тока пучка оказывается частотно-модулированной. Анализ гармоник сигнала с электростатического электрода приемниками с частотными детекторами позволяет выделить сигнал, частота которого равна частоте радиально-фазовых колебаний Ω , а амплитуда пропорциональна девиации частоты, т.е. величине $\Omega \Phi_m$, где Φ_m - амплитуда когерентных радиально-фазовых колебаний.

Было показано, что скачкообразные изменения в амплитудах первых двух гармоник сигнала с электростатических электродов и одновременное увеличение фазовых размеров сгустка, регистрируемое на экране электронно-оптического преобразователя, связаны в накопителе ВЭП-1 с наличием когерентных радиально-фазовых колебаний сгустка. Эффект возникал при малых токах (порядка нескольких миллиампер) и при благоприятном, согласно результатам работ /1,2/, знаке расстройки частоты резонатора относительно частоты генератора.

Как показывают расчеты, приведенные в работе /3/, существенной оказывается форма резонансной характеристики системы резонатор-задающий генератор вблизи частот $(\omega_0 - \Omega)$ и $(\omega_0 + \Omega)$, где: ω_0 - частота обращения, а Ω - частота радиально-фазовых колебаний, а также возможность появления резонансов на гармониках тока пучка более высоких, чем

первая.

Если полоса пропускания усилителей для гармоник сигнала на электроде больше, чем $2n(m_f + 1)$, где n — номер гармоники, а m_f — индекс частотной модуляции, то схемы нечувствительны к наличию частотной модуляции и могут служить для наблюдения за изменением распределения частиц по амплитудам радиально-фазовых колебаний.

При измерениях на накопителе ВЭП-2 обнаружено, что наряду с частотной модуляцией сигнала с пикап-электрода с частотой Ω , существует также амплитудная модуляция гармоник с частотой 2Ω , что может объясняться распадом сгустка на две части, колеблющиеся в противофазе π . Амплитудная модуляция наблюдалась на первой ($f = 25$ МГц) и шестой ($f = 150$ МГц) гармониках. Для наблюдения амплитудной модуляции высокие гармоники более эффективны. Например, для сгустка с гауссовым распределением частиц по амплитудам фазовых колебаний

$\left| \frac{da_n}{a_n} \right| = n^2 \omega_0^2 \tau dt$, где τ — длительность импульса на электроде, a_n — амплитуда гармоники.

Т.к. вопросы взаимодействия пучка и резонатора подробно предполагалось изучать в накопителе ВЭП-2, то для этой машины была разработана описываемая ниже стационарная аппаратура. Блок-схема измерений приведена на фиг.1.

Как видно из блок-схемы, измерительная аппаратура состоит из следующих частей:

1. Блока контроля параметров частотной модуляции;
2. Блока контроля параметров амплитудной модуляции первой гармоники сигнала на пикап-электроде ($f = 25$ МГц);
3. Блока контроля параметров амплитудной модуляции шестой гармоники сигнала на пикап электроде;
4. Схемы контроля и калибровки.

Блок контроля параметров частотной модуляции

Блок контроля параметров частотной модуляции позволяет измерять частоту радиально-фазовых колебаний сгустка и девиацию частоты в диапазоне от 0,5 кгц до 100 кгц с точностью $\pm 10\%$ в диапазоне частот радиально-фазовых колебаний от 20 до 200 кгц, начиная с токов пучка

в 1 ма.

Блок (фиг.1) состоит из полосового усилителя ($f_0 = 25$ МГц), ограничителя, частотного детектора, декадного аттенюатора, усилителя частоты модуляции и преобразователя сигналов для подачи его на шлейфовый осциллограф.

Коэффициент усиления полосового усилителя около $1,5 \cdot 10^5$. Неравномерность частотной характеристики в диапазоне от 24 МГц до 26 МГц около 5%, полоса пропускания по уровню 0,7 около 3 МГц. Входные сигналы, начиная с 500 микровольт, приводят к перегрузке нескольких выходных каскадов усилителя, происходит их предварительное ограничение, которое уменьшает глубину имеющейся амплитудной модуляции не менее, чем в 5 раз.

С выхода полосового усилителя сигнал поступает на вход ограничителя, выполненного на двойном триоде 6НЭП. Такая схема работает без сеточных токов и понижает коэффициент амплитудной модуляции в 50-100 раз /4/.

Частотное детектирование осуществляется двухтактным частотно-амплитудным детектором, имеющим преобразователь модуляции со взаиморасстроенными контурами (L_1, L_2) и настроенным третьим анодным контуром (L_3). Частотная характеристика детектора приведена на фиг.2. Крутизна детекторной характеристики 0,4 мв/кгц. Отклонение детекторной характеристики от линейной не более 2,5%. Постоянная времени частотного детектора $0,2 \cdot 10^{-6}$ сек.

Полоса пропускания полосового усилителя и область линейности частотного детектора позволяют измерять параметры радиально-фазовых колебаний, изменяющиеся в указанном выше диапазоне (девиация частоты в интервале $0,5 \pm 100$ кгц, Ω — в интервале 20 ± 200 кгц), если средняя частота обращения сгустка в накопителе изменяется в пределах $24,5 \pm 25,5$ МГц.

После детектирования сигнал частоты радиально-фазовых колебаний подается на компенсированный декадный аттенюатор и затем на вход аperiodического усилителя частоты модуляции. Максимальный коэффициент усиления усилителя частоты модуляции равен $4 \cdot 10^2$. Неравномерность частотной характеристики аттенюатора совместно с аperiodическим усилителем не хуже $\pm 25\%$ при любом ослаблении (аттенюатор имеет ступени ослабления 1:1; 1:10; 1:100). В усили-

теле частоты модуляции имеется ручная регулировка усиления, с помощью которой устанавливается уровень выходного сигнала при калибровке. С выхода усилителя частоты модуляции сигнал через катодный повторитель может быть подан на осциллограф.

В блоке имеется также выход сигнала на шлейфовый осциллограф, для чего сигнал, снимаемый с катодного повторителя дополнительно усиливается и детектируется. Постоянная времени детектора не более $0,05 \cdot 10^{-3}$ сек, что дает возможность фотографировать процессы, изменяющиеся с частотой до 10^3 гц.

Блок контроля параметров амплитудной модуляции первой гармоники сигнала на пикап-электроре

Блок контроля параметров амплитудной модуляции первой гармоники сигнала на пикап-электроре позволяет измерять частоту амплитудной модуляции и глубину амплитудной модуляции, начиная с 1% и выше, с точностью не хуже $\pm 10\%$ для частот модуляции в диапазоне 20 ± 400 кгц, начиная с токов пучка в 1 ма, а также может быть использован для измерения тока в накопителе.

Блок включает в себя полосовой усилитель с $f = 25$ Мгц, схему АРУ, усилитель частоты модуляции, катодный повторитель и детектор для формирования напряжения к шлейфовому осциллографу.

Входное сопротивление полосового усилителя 75ом, полоса пропускания 3Мгц. Частотная характеристика усилителя равномерна в диапазоне частот 24–26 Мгц с точностью 2–3%; максимальный коэффициент усиления 10^4 . Равномерность частотной характеристики в указанном диапазоне предотвращает появление дополнительной амплитудной модуляции из-за наличия фазовых колебаний центра тяжести сгустка. Амплитудная характеристика выходного каскада усилителя линейна вплоть до уровня выходного сигнала 18в. Линейность характеристики детектора при уровнях входного сигнала от 0,6 в и выше не хуже 5%. Последние два фактора могут быть использованы для измерения величины циркулирующего тока в накопителе при колебаниях в 30 раз без дополнительных переключений в аппаратуре. Постоянная времени амплитудного детектора $2 \cdot 10^{-7}$ сек.

Коэффициент усиления усилителя частоты модуляции 30, частотная характеристика равномерна с точностью $\pm 2,5\%$ в диапазоне частот

20 ± 400 кгц. С выхода усилителя сигнал частоты амплитудной модуляции может быть подан на осциллограф, а также поступает на детектор для формирования постоянного напряжения, пропорционального глубине модуляции, для шлейфового осциллографа.

Полосовой усилитель может работать либо с ручной регулировкой усиления (при контроле циркулирующего тока), либо с АРУ (при контроле глубины модуляции). Автоматическая регулировка усиления позволяет поддерживать постоянным уровень несущей частоты на выходе полосового усилителя, что в свою очередь, дает возможность измерять глубину амплитудной модуляции по величине выходного сигнала частоты модуляции независимо от величины циркулирующего тока в накопителе.

Схема АРУ – задержанно-усиленная – выполнена на двойном триоде 6Н2П. На первом триоде выполнен детектор по схеме анодного детектирования с сопротивлением нагрузки в цепи катода. Постоянная времени АРУ может быть сделана 0,08 или 0,16 сек. Продетектированный и усиленный сигнал с катода первого триода подается на управляющую сетку второго триода лампы 6Н3П. Второй триод выполняет роль усилителя постоянного тока с большим (1,5 мгом) сопротивлением в цепи анода. Напряжение АРУ снимается с анода второго триода и подается на управляющие сетки первых трех каскадов полосового усилителя. Опорное напряжение цепи АРУ (– 2 вольта) снимается с делителя на сопротивлениях

R_{17}, R_{18}, R_{19} (фиг.1). Постоянное напряжение на управляющей сетке второго триода лампы 6Н2П по отношению к его катоду выбрано ниже напряжения запирающего, а поэтому в отсутствие сигнала второй триод заперт. При поступлении сигнала на управляющую сетку детекторного каскада постоянное напряжение на его катоде возрастает и это возрастание передается на управляющую сетку второго триода. Когда величина напряжения на управляющей сетке второго триода достигает напряжения отпирания, через лампу начинает протекать ток, и отрицательное напряжение на его аноде (напряжение АРУ) сильно возрастает. При достижении сигналом определенного уровня начинается эффективное действие схемы АРУ, которая при изменении на входе усилителя сигнала на 60 дб на выходе поддерживает его практически постоянным. Регулировка уровня задержки (уровня выходного сигнала) осуществляется с помощью потенциометра

R_{16} и производится при калибровке. С помощью батареи Б–I и потенциометра R_{14} устанавливается режим детекторного каскада. Чтобы предотвратить наброс электронов с катода на управляющие сетки, напряжение накала ламп 6Н2П снижено. Анодное питание схемы АРУ осуществляет-

ся от стабилизированного источника напряжения - 75в.

Блок контроля параметров амплитудной модуляции шестой гармоники сигнала с пикап-электрода

Блок состоит из полосового усилителя с $f = 150$ Мгц, схемы АРУ, детектора, усилителя частоты модуляции и катодного повторителя.

Полосовой усилитель высокой частоты содержит 8 каскадов на лампах 6ЖЯ1 с последовательным включением индуктивности избирательных контуров. Входное сопротивление усилителя близко к 75омам, все каскады усилителя очень тщательно экранированы друг от друга и развязаны по цепям питания. Полоса пропускания полосового усилителя по уровню 0,95-12 Мгц, что предотвращает возможность возникновения дополнительной амплитудной модуляции из-за когерентных колебаний ступка и предполагает возможность изменения частоты обращения на 4%. Ослабление гармоник достаточно для наблюдения амплитудной модуляции на шестой гармонике, начиная с глубины модуляции в $1 \pm 2\%$.

С выхода усилителя сигнал поступает на вход АРУ, работа которой аналогична работе АРУ предыдущего блока, и на амплитудный детектор с постоянной времени $2 \cdot 10^{-7}$ сек. С выхода детектора сигнал частоты модуляции усиливается однокаскадным усилителем с коэффициентом усиления 30. Неравномерность частотной характеристики в диапазоне 20 ± 400 кгц не хуже $\pm 2,5\%$.

Блок может работать начиная с величины тока в накопителе в 1ма.

Калибровка аппаратуры и контроль правильности работы

Блок калибровочных сигналов выдает следующие сигналы: калибровочный сигнал для калибровки блока измерений параметров частотной модуляции с частотой 100кгц и девиацией частоты 1 кгц и 10 кгц;

Калибровочный сигнал для калибровки блока измерений параметров амплитудной модуляции первой гармоники сигнала с пикап-электрода с частотой 100 кгц и глубиной модуляции 1% и 10%.

Сигнал частоты 150 Мгц для проверки функционирования блока контроля параметров амплитудной модуляции шестой гармоники.

На фиг. 3 видны сигналы на выходе блоков для измерения парамет-

ров частотной и амплитудной модуляции на частоте обращения в том случае, когда на входы блоков поданы калибровочные сигналы с частотой девиации 1кгц и глубиной амплитуды модуляции 1%, соответственно, от блока калибровочных сигналов.

В блоке имеется три независимых генератора:

1. Генератор сигнала частотой 150 мгц, напряжение с которого через буферный каскад - фильтр и делитель по кабелю подводится на вход блока контроля параметров амплитудной модуляции шестой гармоники сигнала с пикап-электрода;

2. Два генератора на частоту 25 Мгц, один из которых имеет стабильность частоты не хуже 10^{-3} , а второй - плавную перестройку частоты.

Сигналы последних двух генераторов с разностью частот 100кгц смешиваются на активном сопротивлении в соотношении амплитуд $m = 0,1$ или $m = 0,01$. Для блока измерения параметров амплитудной модуляции на частоте $f = 25$ Мгц, не имеющего в достаточно широком диапазоне частот частотной зависимости, сигнал, снятый с активного сопротивления может служить в качестве калибровочного сигнала с огибающей

$$c(t) = 1 + m \cos(\omega_1 - \omega_2)t \quad [5]$$

Легко показать, что при наличии четкого ограничения сигнала по амплитуде в блоке контроля параметров частотной модуляции, сигнал с активного сопротивления также может быть использован в качестве калибровочного, в этом случае m оказывается индексом частотной модуляции.

Для контроля модулирующей частоты 100кгц (с точностью ± 1 кгц) сигналы частот 25 Мгц и 25,1 Мгц смешиваются в лампе 6Ж2Б, в анодной цепи которой стоит одиночный узкополосный контур (добротность 80), настроенный на 100 кгц. С анода смесителя сигнал промежуточной частоты через катодный повторитель поступает на амплитудный детектор, а затем на индикаторный прибор ИП-1 (фиг.1). Разности частот 100 кгц соответствует максимальное отклонение стрелки индикаторного прибора. Во избежание ошибки при измерениях, включение калибровочных генераторов производится только на время калибровки. Перед калибровкой уровни сигналов генераторов 25 Мгц и 25,1 Мгц устанавливаются равными, контроль уровней также ведется по прибору ИП-1. Точность установки

уровней не хуже 2%. Деление уровня сигнала генератора 25 Мгц в соотношении $\frac{1}{10}$ и $\frac{1}{100}$ производится ступенчатым аттенуатором с точностью не хуже 3%.

Первоначальная калибровка аппаратуры производилась описанным выше способом с использованием лабораторных генераторов, волномеров и измерительных вольтметров высокой точности.

Измерительный прибор ИИ-1 через переключатель П-6 в процессе измерения и калибровки может подключаться к различным точкам схемы и контролирует (в качестве измерительного прибора используется микроамперметр М-592):

- напряжение накала всех ламп;
- анодное напряжение;
- отрицательное напряжение - 75 в для схем АРУ;
- уровень сигнала калибровочного генератора 25 Мгц;
- уровень сигнала калибровочного генератора 25,1 Мгц;
- модулирующую частоту 100 кгц калибровочного сигнала;
- уровень выхода генератора 150 Мгц;
- напряжение сигнала к шлейфовому осциллографу, поступающего от блока контроля параметров частотной модуляции;
- уровень выхода несущей блока контроля параметров амплитудной модуляции первой гармоники сигнала с пикап-электрода;
- напряжение сигнала к шлейфовому осциллографу блока контроля параметров амплитудной модуляции первой гармоники сигнала с пикап-электрода;
- уровень выхода несущей блока контроля параметров амплитудной модуляции шестой гармоники сигнала с пикап-электрода.

Ниже приведены осциллограммы, иллюстрирующие применение описанной выше методики и аппаратуры на накопителе ВЭП-2.

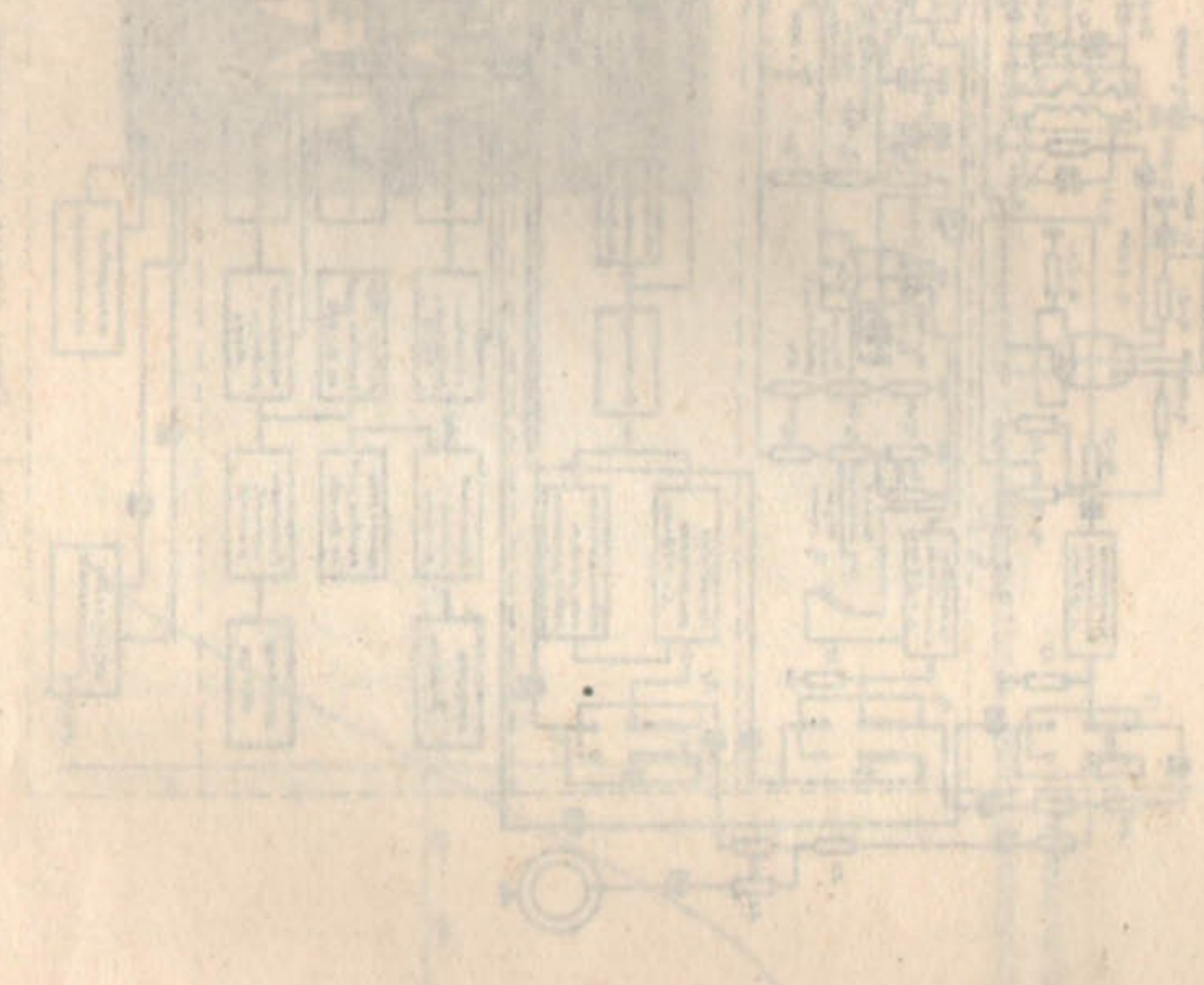
На фиг.4 приведена осциллограмма сигнала амплитудной модуляции шестой гармоники сигнала на электростатическом электроде. Осциллограмма снята с помощью осциллографа ОК-17 М. Глубина модуляции 5%.

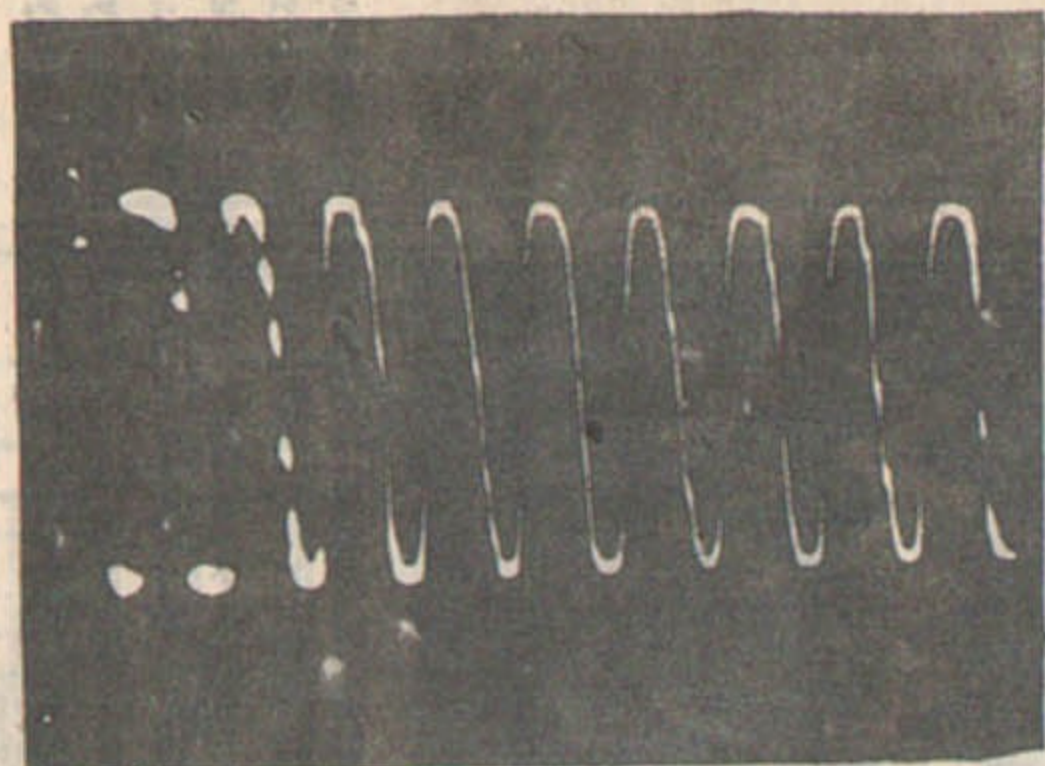
Фиг.5 иллюстрирует применение описанной выше методики для изучения вопроса о фазовой нестабильности электронного пучка в накопителе ВЭП-2 /3/. Осциллограмма снята с помощью шлейфового осциллографа марки МП02. Отсчет лучей проводится сверху вниз.

На первый луч подана первая гармоника сигнала с электростатического электрода, амплитуда первой гармоники пропорциональна току пучка; на второй луч - сигнал с блока измерения параметров частотной модуляции; на третий - сигнал, пропорциональный амплитуде напряжения на резонаторе (менялась частота резонатора относительно частоты задающего генератора); на четвертом луче - сигнал, пропорциональный амплитуде восемнадцатой гармоники на резонаторе (оказалось, что пучок возбуждает резонатор на частоте, близкой к 450 Мгц).

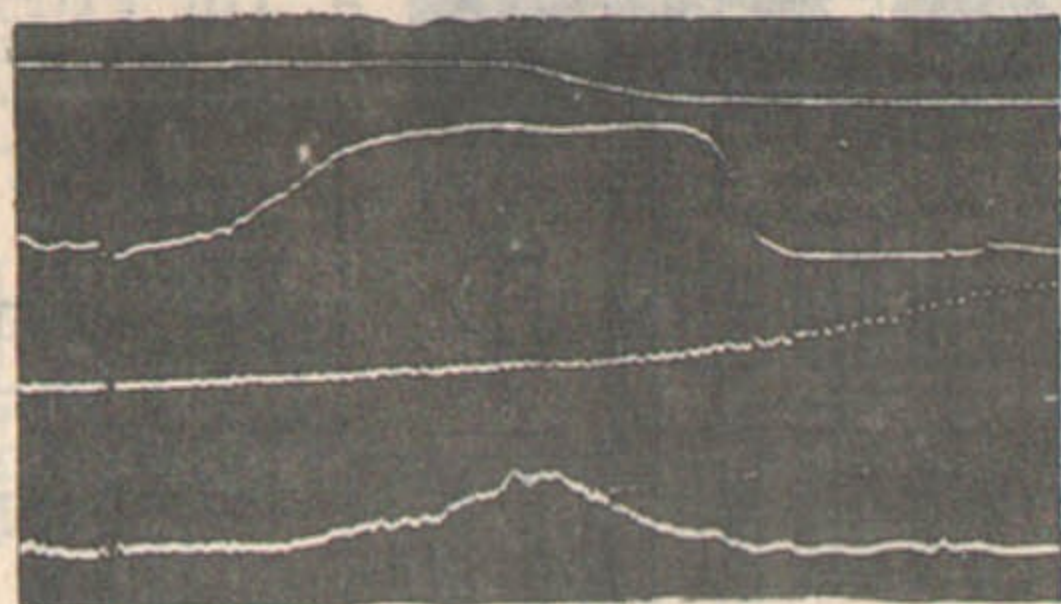
Из осциллограммы видно, что возбуждение резонатора пучком на 18-й гармонике приводит к сильной раскачке когерентных радиально-фазовых колебаний и высыпанию большей части электронов из сепаратриссы; начальный ток пучка 60 ма.

В заключение авторы выражают благодарность А.Н.Скринскому и М.М.Карлинеру за полезные обсуждения.





Фиг. 4. Сигнал на выходе блока измерения параметров амплитудной модуляции шестой гармоники сигнала с пикап-электрода при работе с пучком. Глубина модуляции 5%. Частота модуляции 200 кгц.



Фиг. 5. Осциллограмма, снятая со шлейфового осциллографа при изучении эффектов фазовой неустойчивости сгустка в накопителе ВЭП-2. Сигнал с блока измерения параметров частотной модуляции подан на второй (сверху) луч.

Л и т е р а т у р а

1. I. Henry, J. Appl Phys. 1960. 31, 1338.
2. А.И. Барышев, С.А. Хейфец, ЖТФ, 1963, 33, 820.
3. В.А. Ауслендер, М.М. Карлинер и др. Фазовая неустойчивость интенсивных электронных пучков в накопителях. Доклад, представленный на Международную конференцию по ускорителям, Фраскати, Италия.
4. В.И. Сифоров. Радиоприемники сверхвысоких частот, 1957, Москва.
5. А.А. Харкевич. Спектры и анализ, 1962, Москва.

Ответственный за выпуск В.П. Куграшов

Отпечатано на ротапринтере в ИЯФ СО АН СССР
Тираж 150 экз. Бесплатно
ял.