

ПРИБОР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ КОГЕРЕНТНЫХ РАДИАЛЬНО-ФАЗОВЫХ КОЛЕБАНИЙ В НАКОПИТЕЛЯХ УСТАНОВОК СО ВСТРЕЧНЫМИ ПУЧКАМИ

Е. А. ПИРУШКИН, Т. П. СТАРОДУБЦЕВА

(Получено 24 ноября 1965 г.)

Описан метод наблюдения радиально-фазовых колебаний сгустка в накопителях путем анализа гармонических составляющих сигнала с электростатического электрода. Измерительная аппаратура описана на примере прибора для накопителя ВЭПП-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 1 мА, а также глубину и частоту амплитудной модуляции первой и шестой гармоник сигнала на электроде.

Наличие сигнала, наводимого электронным сгустком на резонатор, может привести к тому, что, начиная с некоторых токов, система пучок — резонатор может оказаться нестабильной к возмущению 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 [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 $2(\Omega + n\Delta\omega_0)$, где n — номер гармоники, а $\Delta\omega_0$ — девиация частоты, 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 ВЭПП-2 обнаружено, что наряду с частотной модуляцией сигнала с электрода с частотой Ω существует также амплитудная модуляция гар-

моник с частотой 2Ω , что может объясняться распадом сгустка на две части, колеблющиеся в противофазе [1]. 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

$$\left| \frac{da_n}{a_n} \right| = n^2 \omega_0^2 \tau d\tau,$$

где τ — длительность импульса на электроде, a_n — амплитуда гармоники. Так как вопросы взаимодействия пучка и резонатора подробно предполагалось изучать в накопителе ВЭПП-2, то для этой машины была разработана описываемая ниже стационарная аппаратура.

Блок-схема измерений приведена на рис. 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 электроде ($f = 25$ МГц); 3) блока контроля параметров амплитудной модуляции шестой гармоники сигнала на электроде; 4) схемы контроля и калибровки.

1. 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 до 100 кГц с точностью $\pm 10\%$ в диапазоне частот ра-

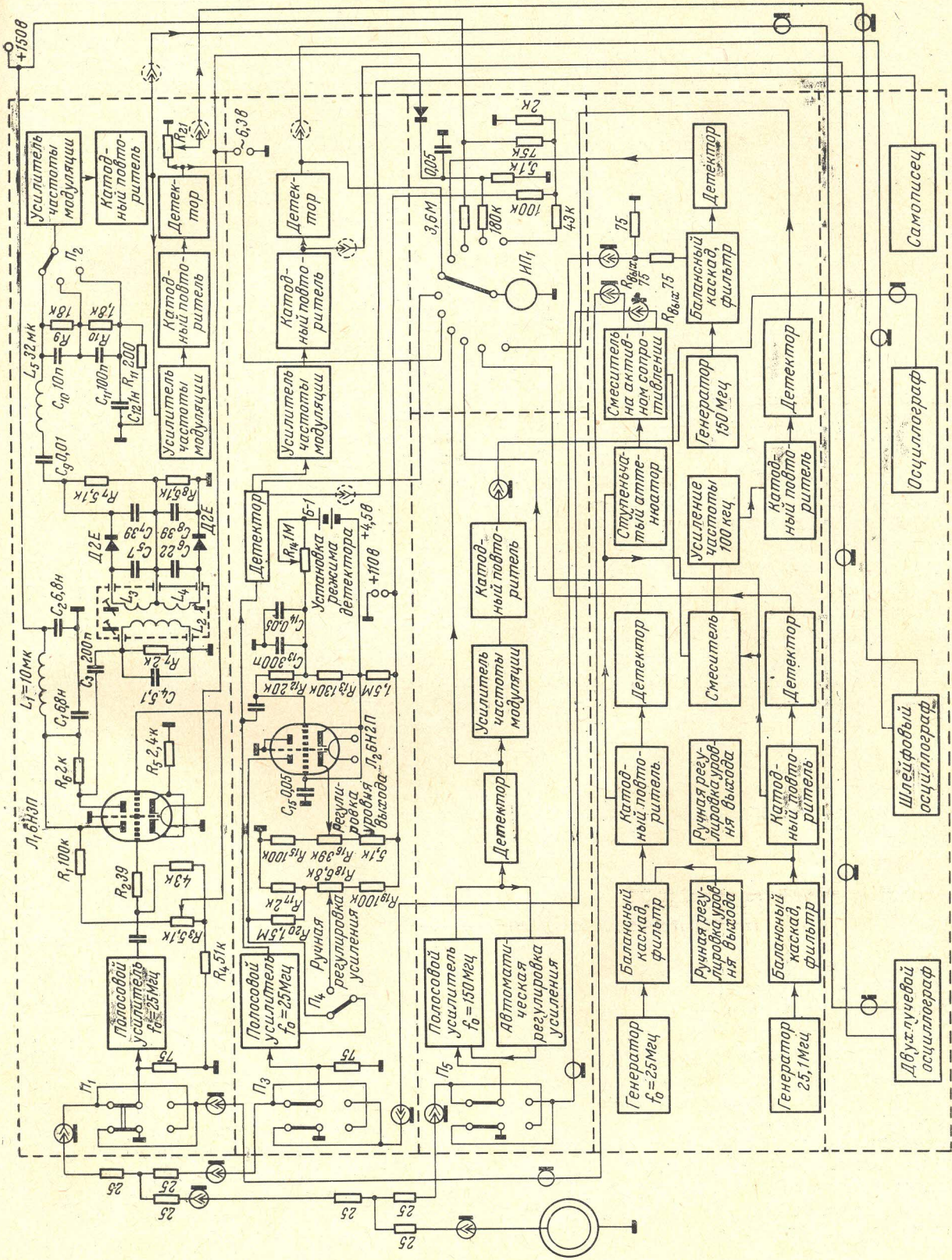


Рис. 1. Блок-схема измерений параметров когерентных радиально-фазовых колебаний в накопителе для встречных электрон-позитронных пучков (ВЭПП-2)

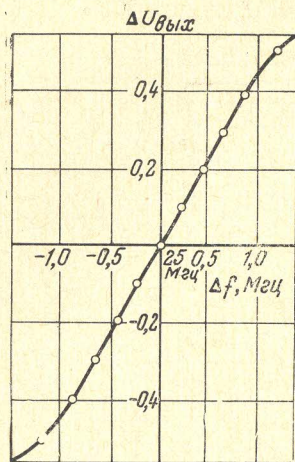


Рис. 2. Характеристика чувствительности частотного детектора

диально-фазовых колебаний от 20 до 200 кГц, начиная с токов пучка равных 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 их на шлейфовый осциллограф. Коэффициент усиления полосового усилителя $\sim 1,5 \cdot 10^5$. Неравномерность частотной характери-

стики в диапазоне от 24 до 26 МГц $\sim 5\%$, полоса пропускания по уровню $0,7 \sim 3$ МГц. Входные сигналы, начиная с 500 мкв, приводят к перегрузке нескольких выходных каскадов усилителя, вследствие чего 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 6НЗП. Такая схема работает без сеточных токов и понижает коэффициент амплитудной модуляции в $50 \div 100$ раз [4].

Частотное детектирование осуществляется двухтактным частотно-амплитудным детектором, имеющим преобразователь модуляции со взаимнорасстроенными контурами (L_1, L_2) и настроенным третьим анодным контуром (L_3). Частотная характеристика детектора показана на рис. 2. Крутизна ее $0,4$ мв/кГц, отклонение 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 $0,5 \div 100$ кГц, $\Omega = 20 \div 200$ кГц), если средняя частота обращения сгустка в накопителе изменяется в пределах $24,5 \div 25,5$ МГц.

После детектирования сигнал, имеющий частоту 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 $\pm 2,5\%$ при любом ослаблении (аттенюатор имеет ступени ослабления 1 : 1; 1 : 10; 1 : 100). В усилителе частоты модуляции имеется ручная регулировка усиления, 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 записывать процессы, изменяющиеся с частотой до 10^3 гц.

2. БЛОК КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ АМПЛИТУДНОЙ МОДУЛЯЦИИ ПЕРВОЙ ГАРМОНИКИ СИГНАЛА НА ЭЛЕКТРОДЕ

Блок контроля параметров амплитудной модуляции первой гармоники сигнала на электроде позволяет измерять частоту и глубину амплитудной модуляции, начиная с 1% и выше, с точностью не хуже $\pm 10\%$ для частот модуляции в диапазоне $20 \div 400$ кГц, начиная с токов пучка равных 1 ма, а также может быть использован для измерения тока в накопителе. Блок содержит полосовой усилитель с $f = 25$ МГц, схему а. р. у., усилитель частоты модуляции, катодный повторитель и детектор для формирования напряжения к шлейфовому осциллографу.

Входное сопротивление полосового усилителя 75 ом, полоса пропускания 3 МГц. Частотная характеристика усилителя равномерна в диапазоне частот $24 \div 26$ МГц с точностью $2 \div 3\%$; 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 18 в. Линей-

ность 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 $20 \div 400$ кГц. С выхода усилителя сигнал, имеющий частоту амплитудной модуляции, 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 а. р. у. (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 а. р. у. (задержанно-усиленная) выполнена на двойном триоде 6Н2П. На первом триоде выполнен детектор по схеме анодного детектирования с сопротивлением нагрузки в цепи катода. Постоянная времени а. р. у. может быть сделана 0,08 или 0,16 сек. Продетектированный и усиленный сигнал с катода первого триода подается на управляющую сетку второго триода 6Н3П. Второй триод выполняет роль усилителя постоянного тока с большим (1,5 Мом) сопротивлением в цепи анода. Напряжение а. р. у. снимается с анода второго триода и подается на управляющие сетки первых трех каскадов полосового усилителя. Опорное напряжение цепи а. р. у. (-2 в) снимается с делителя на сопротивлениях $R_{17} \div R_{19}$ (рис. 1). Постоянное напряжение на управляющей сетке второго триода 6Н2П по отношению к его катоду выбрано ниже напряжения зашпирирования, 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 отпирирования, через лампу начинает протекать ток, и отрицательное напряжение на его аноде (напряжение а. р. у.) сильно возрастает. При достижении сигналом определенного уровня начинается эффективное действие схемы а. р. у., которая при изменении на входе усилителя сигнала на 60 дБ на выходе поддерживает его практически постоянным. Регулировка уровня задержки (уровня выходного сигнала) осуществляется при калибровке потенциометром R_{16} . При помощи батареи Б-1 и потенциометра R_{14} устанавливается режим детекторного каскада. Чтобы предотвратить попадание электронов с катода на управляющую сетку, напряжение накала ламп 6Н2П снижено. Для анодного питания схемы а. р. у. используется стабилизированный источник напряжения — 75 в.

3. БЛОК КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ АМПЛИТУДНОЙ МОДУЛЯЦИИ ШЕСТОЙ ГАРМОНИКИ СИГНАЛА С ЭЛЕКТРОДА

Блок состоит из полосового усилителя с $f_0 = 150$ МГц, схемы а. р. у., детектора, усилителя частоты модуляции и катодного повторителя. Полосовой усилитель высокой частоты содержит 8 каскадов на 6Ж9П с последовательным включением индуктивности избирательных контуров. Входное сопротивление усилителя близко к 75 ом, все каскады усилителя очень тщательно экранированы друг от друга и развязаны по цепям питания. Полоса пропускания полосового усилителя по уровню 0,95 составляет 12 МГц, что предотвращает возможность возникновения дополнительной амплитудной модуляции из-за когерентных колебаний сгустка и предполагает возможность изменения частоты обращения на 4%. Ослабление гармоник достаточно для наблюдения амплитудной модуляции на шестой гармонике, начиная с глубины модуляции 1 ÷ 2%. С выхода усилителя сигнал поступает на вход а. р. у., работа которой аналогична работе а. р. у. 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 $20 \div 400$ кГц не хуже $\pm 2,5\%$. Блок может работать, начиная с тока в накопителе в 1 ма.

4. КАЛИБРОВКА АППАРАТУРЫ И КОНТРОЛЬ ПРАВИЛЬНОСТИ РАБОТЫ

Блок калибровочных сигналов дает следующие сигналы: 1) калибровочный сигнал для калибровки блока измерений параметров частотной модуляции с частотой 100 кГц и девиацией частоты 1 и 10 кГц; 2) калибровочный сигнал для калибровки блока измерений параметров амплитудной модуляции первой гармоники сигнала с электрода с частотой 100 кГц и глубиной модуляции 1 и 10%; 3) сигнал частоты 150 МГц для проверки функционирования блока контроля параметров амплитудной модуляции шестой гармоники.

На рис. 3 даны сигналы на выходах блоков для измерения параметров частотной и амплитудной модуляции на частоте обращения в том случае, когда на входы блоков поданы калибровочные сигналы с частотой девиации 1 кГц и глубиной амплитудной модуляции 1%.

В блоке три независимых генератора: 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 электрода; 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 100 кГц смешиваются на активном сопротивлении в отношении амплитуд $m = 0,1$ или $m = 0,01$. Для блока измерений параметров амплитудной модуляции на частоте $f = 25$ МГц, не имеющего частотной зависимости в достаточно широком диапазоне частот, сигнал,

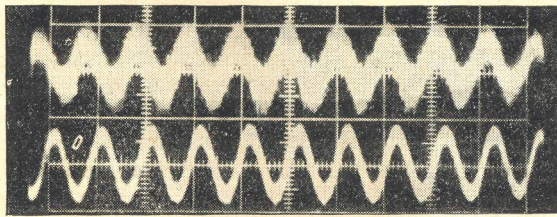


Рис. 3. Сигналы на выходах блока измерения параметров частотной модуляции (верхний луч) при частоте модуляции 100 кГц и девиации частоты 1 кГц и блока измерения параметров амплитудной модуляции на частоте обращения 25 МГц (нижний луч) при частоте модуляции 100 кГц и глубине модуляции 1%

снятый с активного сопротивления, может служить калибровочным сигналом 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 100 кГц (с точностью ± 1 кГц) сигналы частот 25 и 25,1 МГц смешиваются в лампе 6Ж2П, 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 (рис. 4). 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 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 1/10 и 1/100 производится ступенчатым аттенуатором с точностью не хуже 3%. Первоначальная калибровка аппаратуры была выполнена описанным выше способом с использованием лабораторных генераторов, волномеров и измерительных вольтметров высокой точности.

Измерительный прибор ИП-1 через переключатель П-6 в процессе измерения и калибровки может подключаться к различным точкам схемы и при этом контролирует (в качестве измерительного прибора используется микроамперметр М-592): напряжение накала всех ламп; анодное напряжение; отрицательное напряжение — 75 в для схем а. р. у.; 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

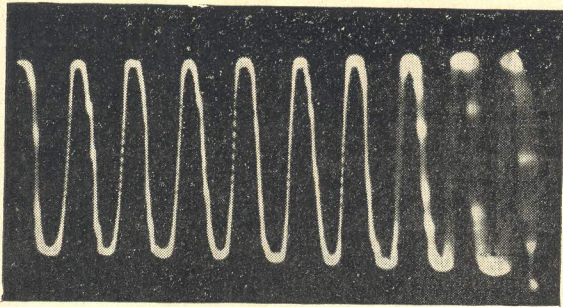


Рис. 4. Сигнал на выходе блока измерения параметров амплитудной модуляции шестой гармоники сигнала с электрода при работе с пучком. Глубина модуляции 5%. Частота модуляции 200 кГц.

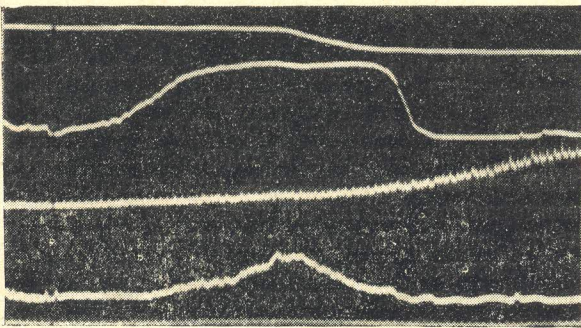


Рис. 5. Осциллограмма, снятая со шлейфового осциллографа при изучении эффектов фазовой неустойчивости сгустка в накопителе ВЭПП-2. Сигнал с блока измерения параметров частотной модуляции подан на второй (сверху) луч

выхода несущей блока контроля параметров амплитудной модуляции первой гармоники сигнала с электрода; напряжение сигнала к шлейфовому осциллографу блока контроля параметров амплитудной модуляции первой гармоники сигнала с электрода; уровень выхода несущей блока контроля параметров амплитудной модуляции шестой гармоники сигнала с электрода.

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

На рис. 4 показана осциллограмма сигнала амплитудной модуляции шестой гармоники сигнала на электростатическом электроде. Осциллограмма снята при помощи осциллографа ОК-17М. Глубина модуляции 5%.

Рис. 5 иллюстрирует применение методики к изучению вопроса о фазовой неустойчивости электронного пучка в накопителе ВЭПП-2 [3]. Осциллограмма снята при помощи шлейфового осциллографа МПО2. Отсчет лучей проводится сверху вниз. На 1-й луч подана первая гармоника сигнала с электростатического электрода, амплитуда первой гармоники пропорциональна току пучка; на 2-й луч-сигнал с блока измерения параметров частотной модуляции; на 3-й — сигнал, пропорциональный амплитуде напряжения на резонаторе (изменялась частота резонатора относительно частоты задающего генератора); на 4-й — сигнал, пропорциональный амплитуде 18-й 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 приводящей к «высыпанию» большой части электронов из сепаратриссы; начальный ток пучка 60 мА.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. I. Непгу, J. Appl. Phys., 1960, 31, 1338.
2. А. И. Барышев, С. А. Хейфец, Ж. техн. физ., 1963, 33, 320.
3. В. Л. Ауслендер, М. М. Карлинер, А. А. Наумов, С. Г. Попов и др., Доклад, представленный на Международную конференцию по ускорителям, Фраскати, Италия, 1965 г.
4. В. И. Сифоров, Радиоприемники сверхвысоких частот, 1957, Оборонгиз.
5. А. А. Харкевич, Спектры и анализ, 1962, Физматгиз.