

С 77

препринт

Т.П.Стародубцева

**Приборы для измерения циркулирующего  
тока электростатическими электродами в  
установках со встречными пучками**



Описан способ измерения и измерительная аппаратура для измерения циркулирующего тока в накопителях и ускорителях-инжекторах; т.к. фазовые размеры сгустков в накопителях малы, то измерение амплитуд первых двух гармоник сигнала с электростатических электродов дает принципиальную точность не хуже 8% для всех режимов работы накопителей. Результаты измерений тока электростатическими электродами совпадают с результатами световых измерений на накопителях с точностью  $10 \pm 15\%$ . В ускорителях-инжекторах проводились измерения по первым гармоникам сигналов на электродах.

### Способ измерения

Методы измерения циркулирующего тока по его электромагнитному полю хорошо известны и широко используются в ускорителях /1-7/. Т.к. фазовые размеры сгустков в накопителях малы, то резонансный вариант этих методов дает хорошую точность. Помимо проведения абсолютных измерений циркулирующего тока в накопителях ВЭИ-1 (встречные электронные пучки) и ВЭИП-2 (встречные электрон-позитронные пучки), проводились также относительные измерения в ускорителях-инжекторах Б2-С и Б3-М.

Как известно, ток, циркулирующий по орбите машины, может быть представлен как

$$I = \frac{I_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} I_n \cos(n\omega_0 t - \varphi_n) .$$

В накопителе ВЭИ -1 частота ускоряющего напряжения в два раза больше частоты обращения и на орбите имеется два сгустка с произвольным распределением частиц между ними. В ВЭИП-2 один сгусток электронный, второй - позитронный, оба сгустка ускоряются одним резонатором (фиг.1). Если датчик для измерения тока расположен согласно фиг.1, то для обеих машин при гауссовом распределении частиц по амплитудам радиально-фазовых колебаний

$$N(\theta) = [2\pi(\theta^2)]^{-1/2} \exp\left[-\frac{\theta^2}{2\theta^2}\right], \quad \text{имеем:}$$

$$I_n = 2 \left\{ I_{o1} \exp\left[-\frac{n^2(\overline{\theta^2})_1}{2}\right] \pm I_{o2} \exp\left[-\frac{n^2(\overline{\theta^2})_2}{2}\right] \right\} ;$$

индексы "1" и "2" относятся к двум сгусткам, знак "+" соответствует четным гармоникам, знак "-" - нечетным для двух электронных сгустков, и наоборот - для электронного и позитронного сгустка. При  $n^2(\overline{\theta^2})_1 \ll 1$  и  $n^2(\overline{\theta^2})_2 \ll 1$

$$I_n = 2( I_{o1} \pm I_{o2} ) .$$

Как видно из последнего выражения, для измерения тока в накопителе ВЭП-1 должна быть использована вторая гармоника. Для измерения только электронного или только позитронного тока можно использовать первые две гармоники; сложение и вычитание амплитуд этих гармоник может дать представление о числе электронов и позитронов при их совместном существовании, если их количества отличаются друг от друга в пределах одного порядка.

Т.к. во всех машинах, кроме синхротрона БЗ-М, использовать ферритовые кольца оказалось невозможным, то вопрос о выборе датчиков для измерения тока решился в пользу электростатических пикап-электродов.

Если предположить, что когерентные эффекты, могущие привести к изменению фазовых размеров сгустка, отсутствуют и в накопителях они определяются, в основном, квантовыми флуктуациями излучения, то при любых возможных режимах работы машин длина сгустка не превышает 0,1 длины орбиты. Это дает погрешность в определении составляющей по первым двум гармоникам не более 8%.

В ускорителях фазовые размеры сгустка составляют в конце ускорительного цикла 20-30% длины орбиты, но т.к. предполагалось проводить лишь относительные измерения тока, то наблюдать за изменением амплитуд первых гармоник оказалось достаточным.

Синхротрон Б-ЗМ работает на третьей гармонике частоты обращения. Т.к. инжектируемый из линейного ускорителя сгусток равен примерно четверти длины орбиты синхротрона, то, в зависимости от режима, на орбите машины может быть от одного до трех сгустков с произвольным распределением частиц в сепаратриссах. Помимо обычной задачи относи-

тельного измерения тока в конце ускорительного цикла оказывается интересным фиксировать режим трех сгустков. Для этого одновременно измеряются амплитуды первой и третьей гармоник тока. Отсутствие первой гармоники означает, что на орбите мишины имеется три сгустка с одинаковым распределением частиц в них. Имеется также возможность проводить относительные измерения величины тока, попавшего в синхротрон из инжектора.

В синхротроне Б2-С лишь один сгусток, и относительные измерения тока стандартны.

### Конструкция электростатических электродов

Фиг. 2 и 3 дают представление о конструкции пикап-электродов в накопителях ВЭП-1 и ВЭП-2. Измерения показали, что электростатический электрод ВЭП-2 нечувствителен к положению пучка при всех разумных положениях равновесной орбиты.

Форма пикап-электрода в ускорителе Б2-С аналогична форме электрода в накопителе ВЭП-2 и полностью повторяет в своем поперечном сечении сечение резонатора синхротрона. Введение электрода любой другой формы в безжелезный ускоритель могло привести к искажению ведущего магнитного поля. Т.к. электрод был помещен в работающую машину, то отсутствие экранирующих от попадания электронов поверхностей не представлялось опасным (в накопителях этой проблемы нет из-за большого времени жизни пучка). Особенностью конструкции является то, что обе обкладки электрода изолированы от корпуса камеры, в противном случае из-за полевых наводок (токи, формирующие магнитное поле, текут по стенкам вакуумной камеры) провести измерения оказалось невозможным. Электрод соединен с корпусом машины через сопротивление 200-300ком.

Электрод в синхротроне Б3-М имеет замкнутую конфигурацию и хорошо экранирован.

Величины емкостей между обкладками электродов таковы:  
синхротрон Б2-С - 250 пф; накопитель ВЭП-1 - 10 пф; синхротрон Б3-М - 30 пф; накопитель ВЭП-2 - 40 пф.

Вводы всех электродов представляют собой отрезки коаксиальных линий с волновым сопротивлением 75ом и пренебрежимо малыми коэффициентами отражения в местах вакуумных уплотнений.

## Измерительная аппаратура

### I. Синхротрон Б2-С-инжектор электронов в накопитель для встречных электрон-электронных пучков

Для измерений использовалась вторая гармоника сигнала с пикап-электрода (222,6 МГц). Измерения на первой гармонике оказались невозможными, т.к. камера машины для длины волны резонатора является волноводом с очень малым затуханием, и наводка на электроде оказалась на уровне тока в несколько ампер.

Для усиления сигнала служит супергетеродинный приемник, настроенный на частоту второй гармоники. Промежуточная частота 30 МГц, полоса пропускания всей схемы около 2,5 МГц. На входе схемы стоит резонансный контур, индуктивно связанный с кабелем, подключенным к электростатическому электроду. Коэффициент усиления измерителя около 20, постоянная времени детектора  $5 \cdot 10^{-6}$  сек., при необходимости чувствительность приемника может быть уменьшена в 10 раз с помощью переключателя, расположенного в тракте усилителя промежуточной частоты. Минимальный ток, измеряемый схемой, 10 мА; надобность в большей чувствительности отсутствовала. Типичная осциллограмма изменения второй гармоники во времени приведена на фиг.4.

### 2. Накопитель ВЭП-1

Частота обращения сгустка в накопителе ВЭП -1 110 МГц. Измерение тока ведется на второй гармонике сигнала с электрода (220 МГц). Блок-схема измерителя тока дана на фиг.5.

Электростатический электрод подключен к канализирующему тракту с волновым сопротивлением 75 Ом. В качестве сопротивления, нагружающего кабель, используется объемное угольное сопротивление УНУ-Ш-0,25-0,75. Сигнал с сопротивления подается на резонансный контур через емкость в 1 пФ. Емкость и сопротивление смонтированы в специальной выносной экранированной коробке (пробнике).

Элементарным расчетом можно показать, что в интересующем нас диапазоне частот входное сопротивление измерителя интенсивности (вместе с пробником) близко к 75 омам, что облегчает калибровку измеритель-

ной аппаратуры с помощью генераторов стандартных сигналов.

При необходимости сигнал может быть ослаблен на входе усилителя промежуточной частоты ступенчатым калиброванным аттенуатором. Максимальное ослабление аттенуатора 500, его входное и выходное сопротивления составляют 75 Ом при любом ослаблении.

Предусмотрена возможность калибровки измерителя тока пучка с помощью калибровочного генератора, смонтированного в одном блоке с приемником. Для этого калибровочный генератор настраивается методом нулевых биений на частоту второй гармоники сигнала, наводимого ступком на пикап-электрод; затем устанавливается фиксированный уровень сигнала калибровки, который подается при калибровке на вход измерителя, и по уровню сигнала на выходе приемника потенциометром регулировки чувствительности устанавливается необходимый коэффициент усиления.

Максимальный коэффициент усиления измерителя около  $1 \cdot 10^4$ , полоса пропускания около 2,5 МГц, подстройкой частоты гетеродина схема может перестраиваться в диапазоне частот входного сигнала 215-225 МГц.

Схема позволяет измерять токи в диапазоне 200 мкА - 3а. Нижний предел измеряемого тока определяется уровнем наводки от резонатора; для уменьшения уровня этой наводки в месте расположения электродов специальной пластиной уменьшено сечение волновода, образованного вакуумной камерой накопителя.

Проводилось также измерение амплитуды первой гармоники сигнала. Сравнение амплитуд первой и второй гармоники позволяет оценивать число электронов в каждой из сепаратрисс.

### 3. БЗ-М-инжектор для накопителя ВЭП-2

В синхротроне БЗ-М существует модуляция частоты. Полоса пропускания усилителей выбиралась в соответствии с этим условием. У приемника, настроенного на третью гармонику сигнала ( $f = 110$  МГц) полоса пропускания равна 10 МГц по уровню 0,95; соответственно, полоса пропускания приемника, настроенного на первую гармонику частоты обращения, равна 3,5 МГц. Т.к. с помощью этой же аппаратуры предполагалось смотреть эффекты, связанные с взаимодействием пучка с ускоряющим резонатором при больших токах (амплитудную модуляцию, вызванную распадом

сгустка на части), то полоса пропускания детектора около 5 Мгц. Коэффициенты усиления схем около  $3 \cdot 10^2$ , что позволяет фиксировать токи, начиная с 1ма. Ступенчатый аттенюатор включен перед входом обоих приемников и ослабляет обе гармоники одновременно в одинаковое число раз с достаточной точностью (не хуже 10%). Максимальное ослабление аттенюатора 500. Т.к. абсолютных измерений проводить не предполагалось, то КБВ на участке электрод - вход аппаратуры не измерялся. Осциллограмма тока приведена на фиг.6.

#### 4. Накопитель ВЭП-2

Измерения проводятся по первым двум гармоникам частоты обращения (25 Мгц и 50 Мгц), схема измерений дана на фиг.7. Детали схем аналогичны деталям для измерения тока в накопителе ВЭП-1. Через ступенчатый аттенюатор и разветвитель (входные и выходные сопротивления 75ом) сигналы с электростатического электрода подаются на резонансные усилители прямого усиления с плавной регулировкой коэффициентов усиления, настроенных на частоты 25 Мгц и 50 Мгц. Максимальные коэффициенты усиления схем около  $2 \cdot 10^4$ , полосы пропускания по уровню 0,95 около 2 Мгц. Схемы позволяют измерять ток по обеим гармоникам, начиная с 20 мка. Наводка от резонатора ( $f = 25$  Мгц) на уровне тока в  $200 \pm 500$  мка, поэтому измерение малых токов ведется по второй гармонике.

При наличии на орбите машины электронного и позитронного тока с помощью схемы можно производить сложение и вычитание амплитуд гармоник, что дает возможность измерять число электронов и число позитронов. Если число частиц различается в 10 раз, то погрешность измерения 100%.

Схемы могут быть откалиброваны с помощью внутреннего генератора методом, описанном в разделе, посвященном измерениям на накопителе ВЭП-1. Т.к. стабильность схем достаточно высока, то такой способ калибровки аппаратуры является достаточно надежным и удобным.

#### Калибровка электродов

Калибровка электродов для абсолютных измерений тока проводилась только для накопителей ВЭП-1 и ВЭП-2 при помощи аналога пучка

в виде заряженного проводника, натянутого внутри электрода.

Накопитель ВЭП-1 не имеет прямолинейных промежутков и калибровочная камера, в которой натягивается нить, моделирующая пучок, представляет собой трубу, поперечное сечение которой повторяет поперечное сечение камеры накопителя в месте расположения электростатических электродов. Элементарный расчет показывает, что кривизной вакуумной камеры можно пренебречь без существенной погрешности.

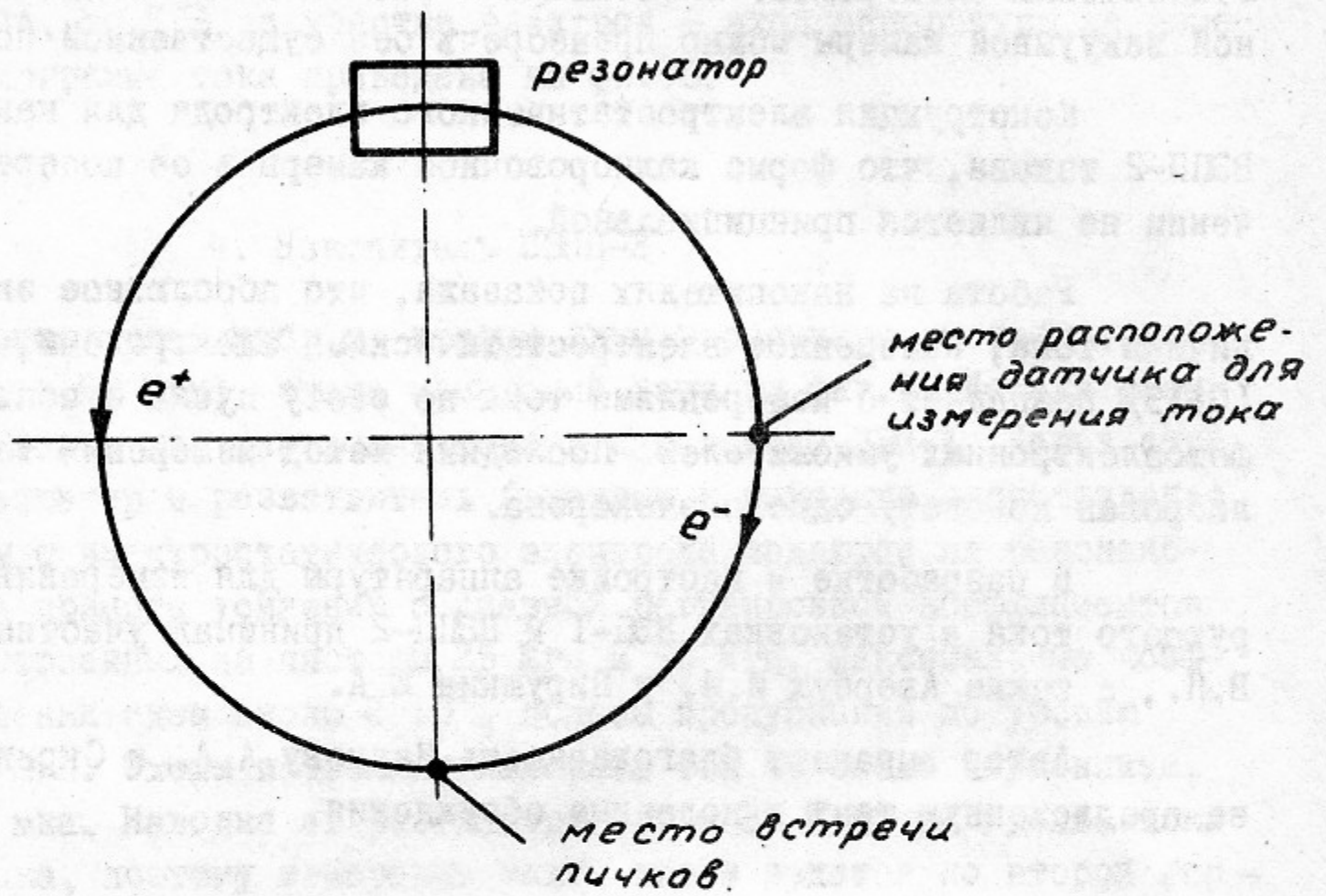
Конструкция электростатического электрода для накопителя ВЭП-2 такова, что форма калибровочной камеры в ее поперечном сечении не является принципиальной.

Работа на накопителях показала, что абсолютное значение величины тока, измеренное электростатическими электродами, с точностью  $10 \pm 15\%$  совпадает с измерениями тока по свету пучка с использованием фотоэлектронных умножителей. Последний метод измерения тока прокалиброван по свету одного электрона.

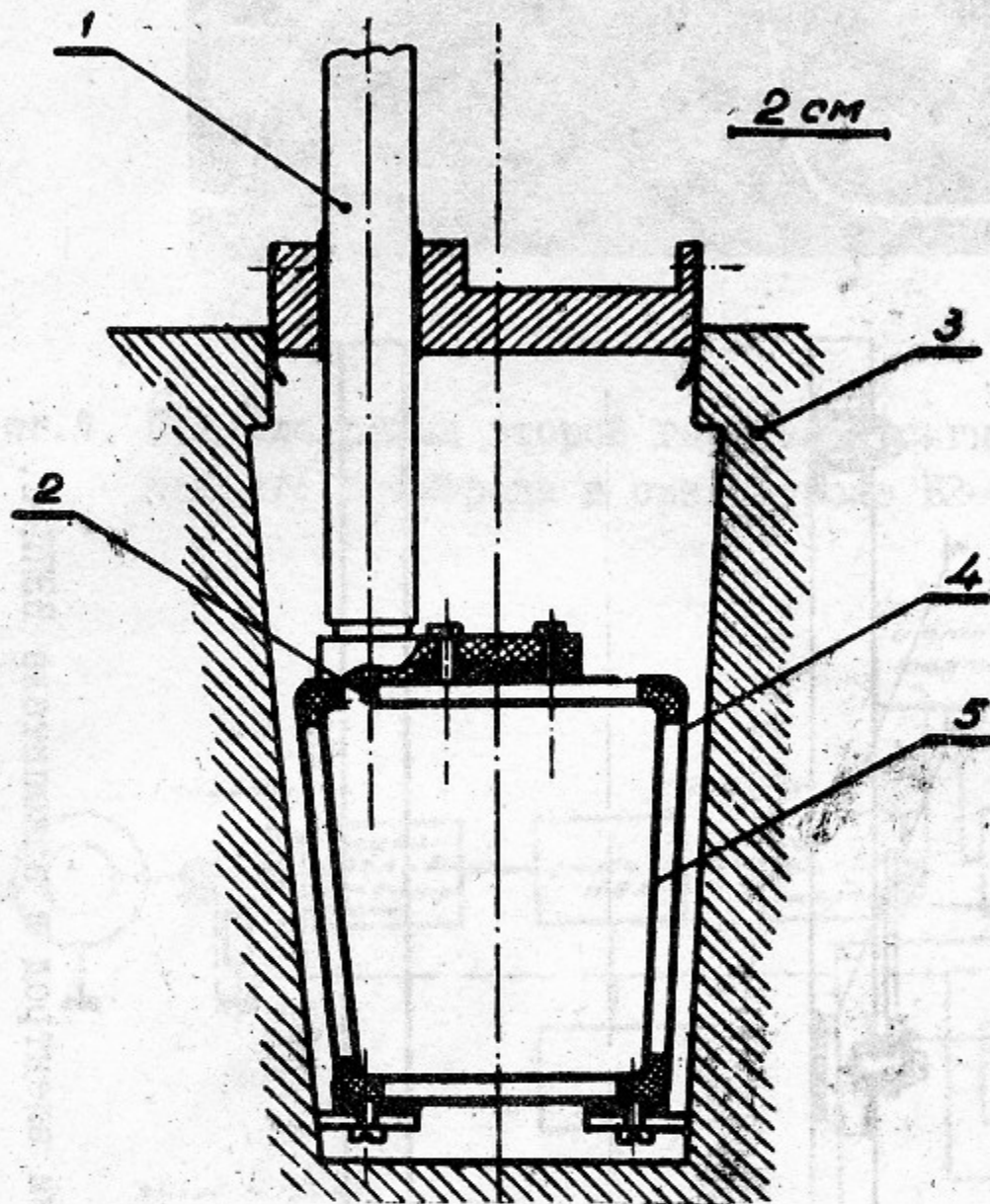
В разработке и настройке аппаратуры для измерения циркулирующего тока в установках ВЭП-1 и ВЭП-2 принимал участие Куграшов В.П., а также Авербух И.И. и Пирушкин Е.А.

Автор выражает благодарность Наумову А.А. и Скринскому А.Н. за предложенную тему и полезные обсуждения.





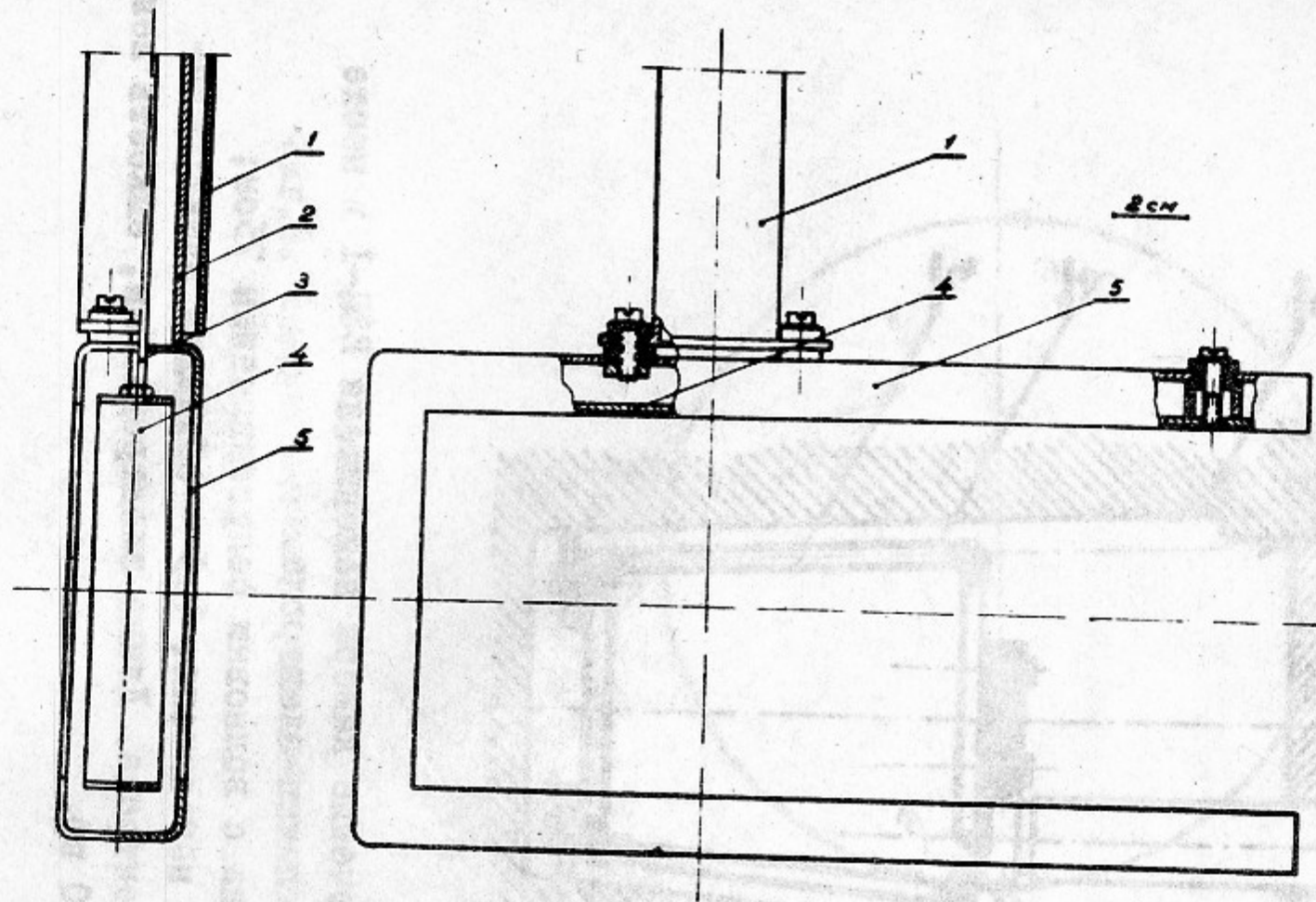
Фиг. I. Расположение пикап-электрода в накопителе ВЭП-2.



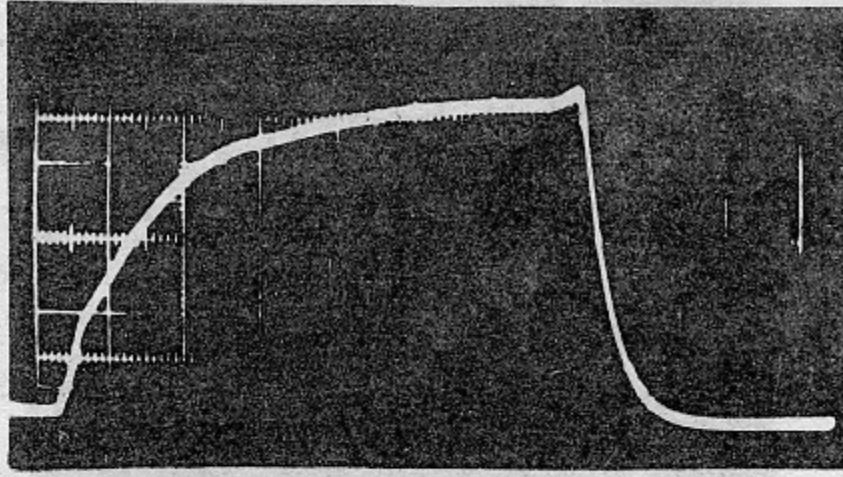
Фиг.2. Поперечное сечение камеры накопителя ВЭП-I в месте расположения пикап-электрода.

1,2 - коаксиал с волновым сопротивлением 75ом;

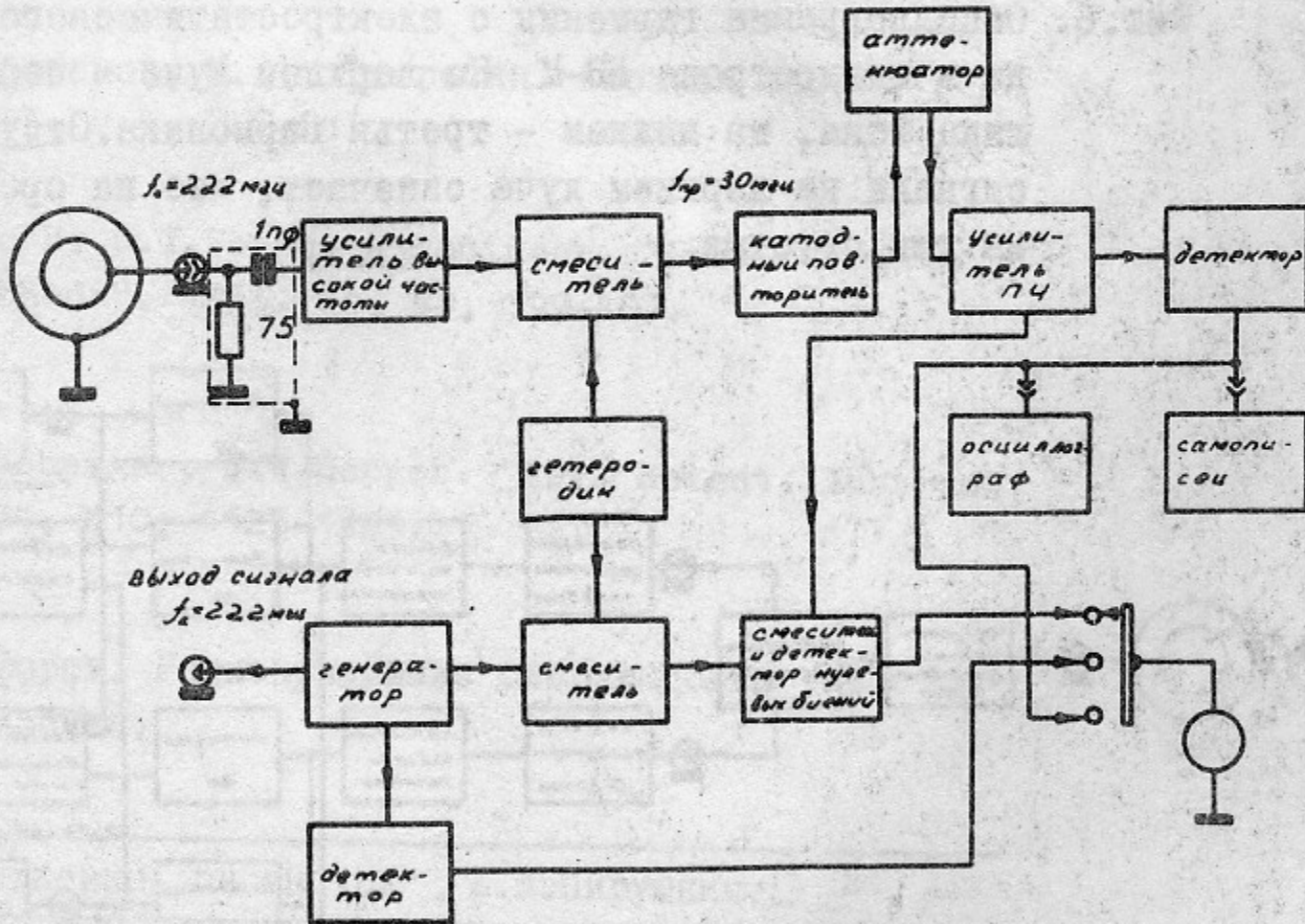
3 - камера накопителя; 4,5 - обкладки электростатического электрода. Длина электрода 5мм, емкость между обкладками 10 пф.



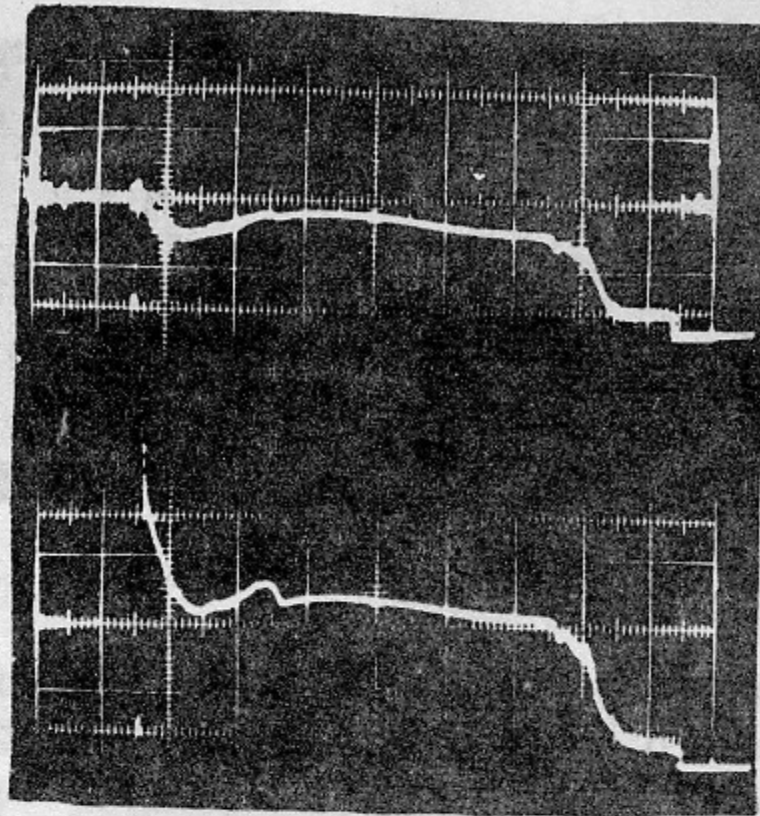
Фиг. 3. Электростатический электрод в накопителе ВЭП-2.  
 1-экран; 2,3-коаксиал с волновым сопротивлением 75ом;  
 4,5-обкладки электрода. Емкость между обкладками 40пф.



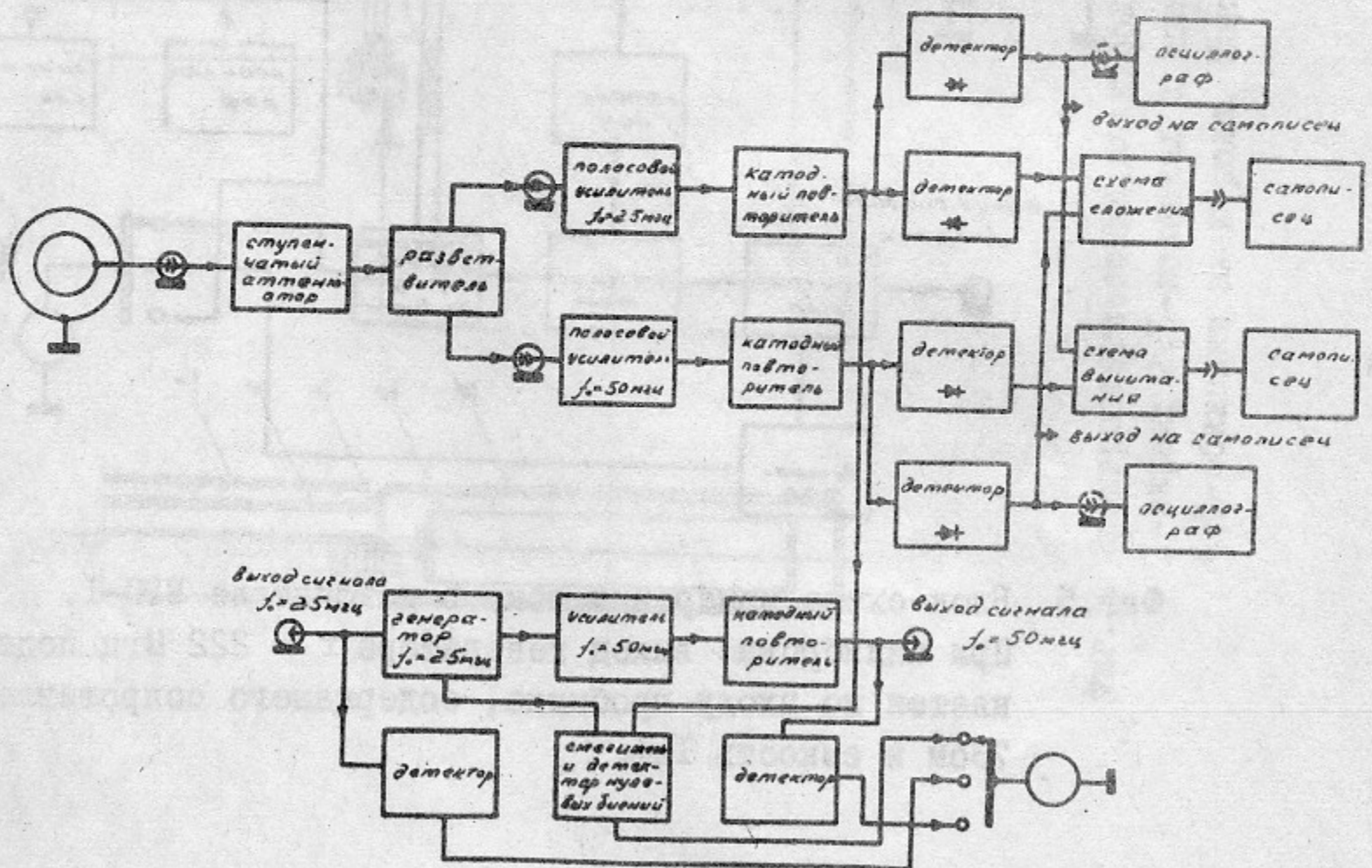
Фиг.4. Осциллограмма второй гармоники сигнала с электростатического электрода в синхротроне Б2-С.



Фиг.5. Блок-схема измерения тока в накопителе ВЭП-1. При калибровке выход генератора  $f = 222 \text{ MHz}$  подсоединяется ко входу пробника, содержащего сопротивление  $75 \Omega$  и емкость  $1 \text{ pF}$ .



Фиг. 6. Осциллограмма гармоник с электростатического электрода в синхротроне БЗ-М. На верхнем луче - первая гармоника тока, на нижнем - третья гармоника. Отсутствие сигнала на верхнем луче означает, что на орбите машины три сгустка.



Фиг. 7. Блок-схема для измерения тока в накопителе ВЭП-2. При калибровке схемы сигналы генераторов с частотами  $f = 25$  МГц и  $f = 50$  МГц подаются на входы измерителя.

## Л и т е р а т у р а

1. Vodopyanov , Kuzmin , Rubchinskiy , Uvarov "Proc. Internat. Conf. High Energy Accelerators and Instrum" CERN, 1959. Geneva, 1959, 470-477.
2. M.Sands. "Nuovo Cimento". 1960. XV, 599.
3. Jamada Ryaji "Inst. Nucl. Study Univ. Tokyo", 1961, N37, 24p.p.
4. А.А.Кузьмин. Приборы и техника эксперимента, 1962, № 4, 121-126.
5. М.П.Карабеков, М.А.Мартirosян. Атомная энергия, 1962, 13, № 4, 337-341.
6. L. Holomb, D.I.Porat, K.Robinson. "Nucl. Instrum. and Methods". 1963. 24, N4, 399-407.
7. W.C.Lineberger, J.W.Hooper. "Rev. Scient. Instrum" 1963, 34, N10, 1123-1125.
8. В.И.Сифоров. Радиоприемники сверхвысоких частот, 1957, Москва.

---

Ответственный за выпуск Е.А.Пирушкин

---

Отпечатано на ротапинтере в ИЯФ СО АН СССР  
Тираж 200 экз. Бесплатно  
ял.

## Л и т е р а т у р а

1. Vodoryanov, Kuzmin, Rubchinskiy, Uvarov "Proc. Internat. Conf. High Energy Accelerators and Instrum." CERN, 1959. Geneva, 1959, 470-477.
2. M.Sands. "Nuovo Cimento". 1960. XV, 599.
3. Jamada Ryaji "Inst. Nucl. Study Univ. Tokyo", 1961, N37, 24p.p.
4. А.А.Кузьмин. Приборы и техника эксперимента, 1962, № 4, 121-126.
5. И.П.Карабеков, М.А.Мартиросян. Атомная энергия, 1962, 13, № 4, 337-341.
6. L. Holomb, D.I.Pogat, K.Robinson. "Nucl. Instrum. and Methods". 1953. 24, № 4, 399-407.
7. W.C.Lineberger, J.W. Hooper. "Rev. Scient. Instrum." 1963, 34, № 10, 1123-1125.
8. В.И.Сифоров. Радиоприемники сверхвысоких частот, 1957, Москва.

---

Ответственный за выпуск Е.А.Пирушкин

---

Отпечатано на ротационте в ИЯФ СО АН СССР  
Тираж 200 экз. Бесплатно  
Ял.