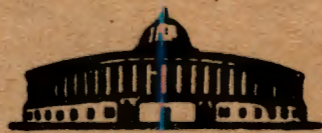


34501

+

944/93

Сайфуллин Ш.З.  
Б2-9-92-567



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Б2-9-92-567

ДЕПОНИРОВАННАЯ ПУБЛИКАЦИЯ

Дубна 1992

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

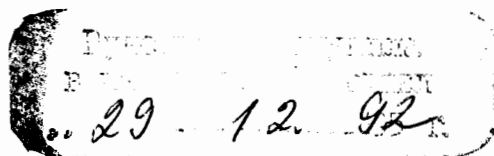
Лаборатория высоких энергий

Б2-9-92-567

Ш.З. Сайфулин

Некоторые вопросы диагностики пучка на с-тау фабрике

Дубна, 1992 г.



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
БИБЛИОТЕКА

В настоящее время в ОИЯИ проектируется комплекс накопительных колец, в который входит с-тау фабрика /1,2/. В свою очередь, в состав с-тау фабрики входят источник, линейный ускоритель, демпфирующе-аккумулирующее кольцо, бустер и основное кольцо. Таким образом, с-тау фабрика является весьма сложным комплексом, включающим в себя несколько различных ускорителей. Поэтому, в дальнейшем мы будем пользоваться термином "ускоритель".

## ДИАГНОСТИКА ПУЧКОВ НА УСКОРИТЕЛЯХ

Для обеспечения удовлетворительных параметров пучков заряженных частиц на выходе ускорителя, а также исследования динамики движения пучка непосредственно в процессе ускорения часто требуется измерять различные его параметры. В зависимости от принципа ускорения и типа ускорителя пучок, находящийся в процессе ускорения или выходящий из ускорителя, может быть непрерывным импульсным или состоящим из одного или большего числа сгустков, следующих один за другим с большой частотой. В связи с тенденцией роста использования ЭВМ и информационно-измерительных и управляющих системах на всех ускорителях (У). возникает вопрос о решении проблемы разработки унифицированных и стандартизованных измерителей параметров пучков заряженных частиц, которые позволили бы судить об основных электрических, геометрических, энергетических и временных характеристиках пучков в широких диапазонах измерения этих параметров.

Более или менее очевидно, что эту проблему можно решить с помощью измерителей, построенных на модульной структуре. Набор таких модулей можно разделить на пять групп:

1. Первичные преобразователи - датчики.
2. Усилительные устройства и коммутаторы.
3. Аналого-цифровые преобразователи.
4. Устройства связи с ЭВМ.
5. Устройства отображения информации.

Устройства последних трех групп успешно разрабатываются и широко используются повсеместно. Это - хорошо известный стандарт КАМАК с широким спектром номенклатуры.

Устройства второй группы также успешно развиваются, но в некоторых случаях необходимо разрабатывать специализированные схемы усилителей и коммутаторов.

Наиболее узким местом является первая группа устройств, несмотря на то, что в настоящее время созданы и разрабатываются различные измерительные преобразователи параметров и характеристик пучков на ускорителях. Однако, не все полностью соответствуют тем требованиям, которые предъявляются к преобразователям, предназначенным для работы в информационно-измерительных и управляющих системах ускорителей.

К числу основных требований относят следующие /3,5/:



1. Минимальность воздействия, оказываемого преобразователем на параметры пучка (прозрачность преобразования).

2. Возможность непрерывного получения информации об измеряемом параметре в широком диапазоне изменения его значения.

3. Высокая помехоустойчивость, эксплуатационная надежность, хорошая стабильность и повторяемость характеристик преобразователя.

4. Электрическая природа выходного сигнала преобразователя и наименьшее количество преобразований измеряемого параметра до ввода в управляющую ЭВМ.

5. Повышенная радиационная стойкость.

Для получения информации о параметрах пучка на У используют преобразователи различного типа, отличающиеся друг от друга не только физическими принципами действия, но и степенью сложности и способами преобразования информации для ввода ее в автоматизированные системы сбора информации и управления.

В соответствии с классификацией /4,6/ первичные преобразователи в зависимости от физического принципа преобразования информации делятся на следующие типы.

Полевые преобразователи, использующие взаимодействие электромагнитного поля, создаваемого пучком заряженных частиц, с измерительным устройством. К этому типу преобразователей относятся электростатические, магнитоиндукционные и резонаторные преобразователи, а также преобразователи, использующие эффект Холла.

Коллекторные преобразователи, принцип действия которых основан на поглощении пучка или его части на измерительных устройствах специальной конструкции, устанавливаемых на пути пучка заряженных частиц, К таким преобразователям относят цилиндр Фарадея, коллиматоры и диафрагмы, щелевые и ламельные преобразователи, зонды и мишени.

Ионизационные преобразователи, в которых для получения информации о параметрах пучка используют различные виды излучения: синхротронное, Вавилова-Черенкова, тормозное, переходное.

Эмиссионные преобразователи, в основе которых лежит явление вторичной эмиссии.

Акустические преобразователи, принцип действия которых основан на регистрации механических напряжений в мишени, специаль-

ных фольгах или проволоках, возникающих при попадании пучка.

Калориметрические преобразователи, которые используют нагревание пучком специальных преобразователей или мишеней для получения информации о параметрах пучка.

Комбинированные преобразователи, которые включают в себя один или несколько вышеуказанных преобразователей с дополнительным воздействием либо на пучок, либо на преобразователь. К этому типу относятся различного типа экраны и детекторы, магнитные и электростатические анализаторы, большинство измерителей эмиттанса пучка и средней энергии ускоренных частиц пучка.

Выбор первичных преобразователей, обеспечивающих информационно-измерительные и управляющие системы полным объемом информации, которая необходима для ее надежного функционирования - довольно сложная задача, тем более, для пучков на с-тау фабриках. Это связано с тем, что (как говорилось выше) с-тау фабрика включает в себя несколько различных ускорителей, отличающихся друг от друга такими важнейшими параметрами как цикличность работы, временная структура пучка, интенсивность и энергия /1,2/. Все это подтверждает мысль о том, что выбор первичных преобразователей для диагностики пучка на с-тау фабрике - действительно сложная задача. Поэтому, для оптимального выбора типа первичного преобразователя необходим тщательный анализ, который будет осуществлен в техническом проекте.

### I. Измерение интенсивности пучка

Описание измерения интенсивности пучка начнем с цилиндра Фарадея, поскольку исторически это самый первый преобразователь, который был использован для измерения интенсивности (тока) и других параметров пучка.

I). Цилиндр Фарадея - это наиболее распространенный прибор, используемый в качестве первичного эталонного прибора для измерения токов пучков заряженных частиц /3,7/. При измерении тока пучок попадает на достаточно массивный, электрически изолированный от окружающих предметов электрод, который задерживает частицы, образующиеся при столкновении частиц с материалом электрода. Цилиндр Фарадея (Ц.Ф.) является обычно частью замкнутой электрической цепи, ток в которой измеряют измерителями тока (по падению напряжения на известном сопротивлении, например).

Основные достоинства рассматриваемого метода измерения - высокая точность (погрешность - десятые доли процента) и возможность измерения весьма малых токов пучков. Благодаря этим особенностям ЦФ часто применяют для абсолютных измерений заряда, переносимого пучком, и для градуировки других измерителей тока. При помощи ЦФ с достаточно высокой точностью измеряют и большие импульсные токи сильноточных наносекундных ускорителей до нескольких МэВ. Интенсивность пучка по току определяется следующим образом:

$$N = \frac{Q}{q},$$

где  $N$  - число частиц в пучке (интенсивность),  $Q$  - заряд пучка,  $q$  - заряд элементарной частицы.

В свою очередь

$$Q = \int_0^{t_u} I(t) dt = \int_0^{T_u} I(t) dt.$$

При ускорении протонов заряд протона равняется заряду электрона, т.е.

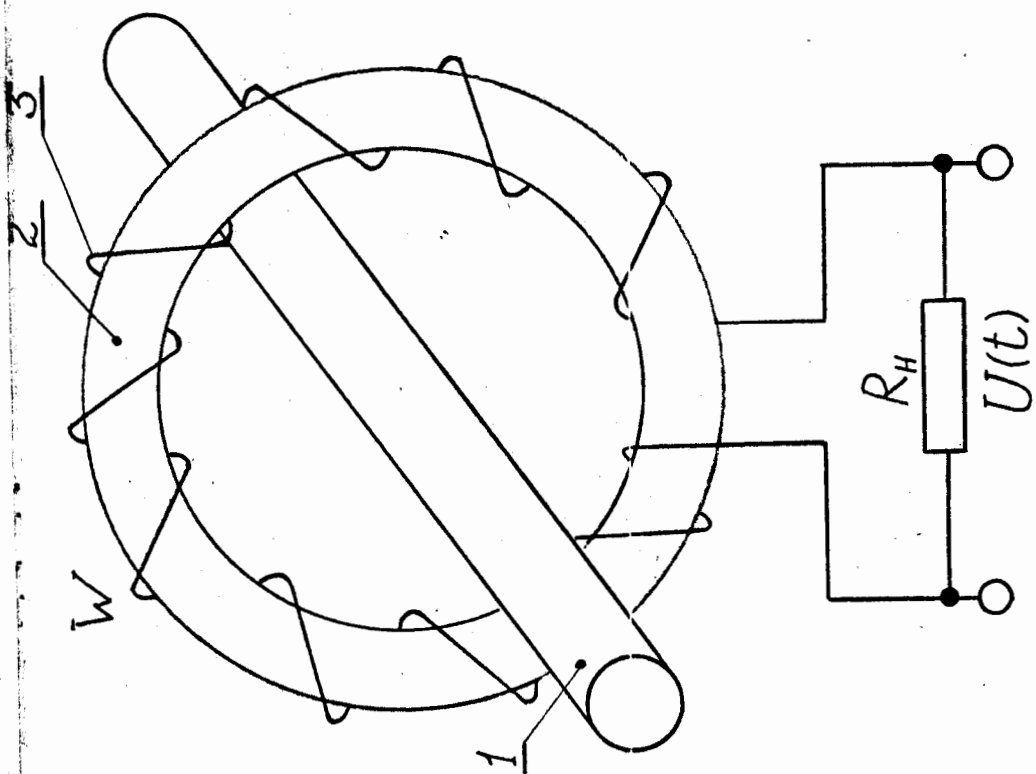
$$N = \frac{Q}{1,6 \cdot 10^{-19}}$$

К недостаткам ЦФ<sup>/3,7/</sup> относятся большие габаритные размеры и большая масса, и то, что ЦФ относится к непрозрачным датчикам (невозможно получить с помощью ЦФ информацию о токе пучка, не нарушая его). Указанные недостатки ограничивают применение ЦФ

Переходим к описанию так называемых прозрачных датчиков, в частности, магнито-индукционных преобразователей.

2). Магнито-индукционные преобразователи (МИП) - такие преобразователи, принцип работы которых основан на регистрации магнитного поля, создаваемого пучком при его движении. Сигнал, наведенный этим полем на витки катушки тороидальной формы, через центр которой проходит пучок, прямо пропорционален значению и скорости изменения тока пучка. Иногда МИП называют поясами Роговского<sup>/7/</sup>. Их обычно изготавливают в виде тороидальной катушки с сердечником из ферромагнитного (чаще всего) материала (рис.1а).

Выбор материала преобразователя обуславливается требованиями к чувствительности датчика. Чем выше проницаемость магнит-



a

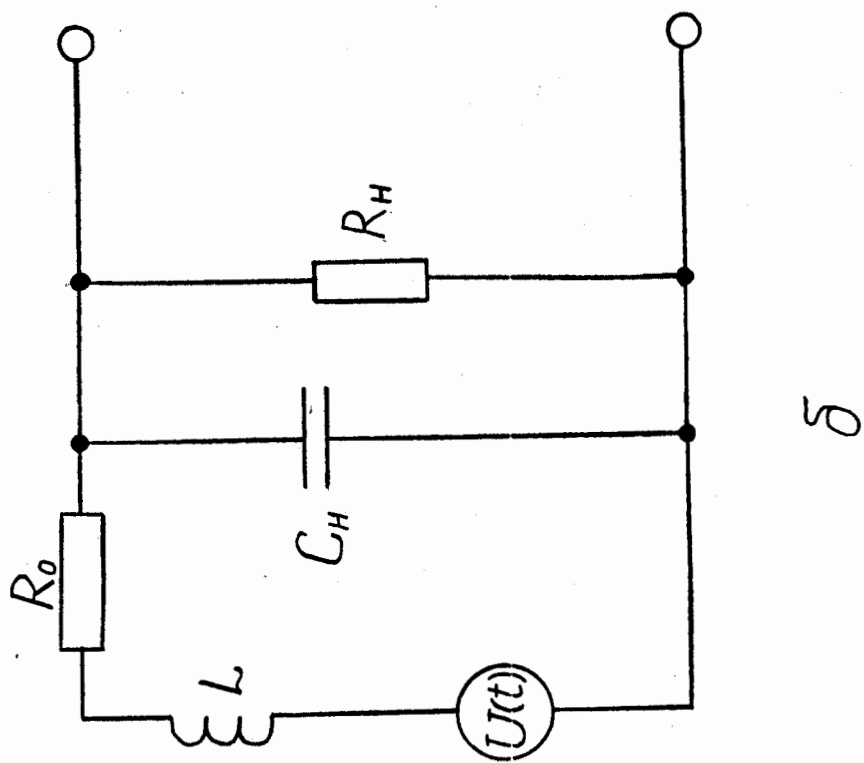


Рис. 1



ного материала, тем выше чувствительность преобразователя. МИП, изображенный на рис. 1а, можно рассматривать как индуктивный генератор, схема замещения которого приведена на рис. 1б. Здесь

$L$  - индуктивность измерителя;  $R_0$  - его внутреннее сопротивление;  $U(t)$  - напряжение на выходе измерителя;  $R_H$  - сопротивление нагрузки;  $C_H$  - емкость нагрузки.  $C_H = C_{И} + C_{ВХ}$ . Где  $C_{И}$  - собственная емкость измерителя;  $C_{ВХ}$  - входная емкость измерительного устройства.

Возможны два режима работы измерителя. При малом сопротивлении нагрузки  $R_H$ , измеритель тока пучка работает в режиме трансформатора тока, а форма импульса напряжения  $U(t)$  повторяет форму импульса тока пучка. Чувствительность МИП в этом режиме низкая. При большом  $R_H$  измеритель работает в режиме контура ударного возбуждения, чувствительность его более высокая, но форма выходного напряжения не соответствует форме импульса тока пучка. Расчетные соотношения и способы включения приведены в литературе<sup>/3,7/</sup>. МИП можно использовать для измерения токов от сотен микроампер до сотен ампер при длительности от единиц наносекунд до тысяч микросекунд.

Применение МИП для измерений ионного тока на участке инжекции синхрофазотрона приведено в работах<sup>/7,8/</sup>. Электронная аппаратура, используемая для этих целей, описана в работах<sup>/8,9/</sup>. Электростатические преобразователи и преобразователи на эффекте Холла для измерения интенсивности на ускорителях не нашли широкого применения в связи с недостатками, указанными в литературе<sup>/3/</sup>.

3. Резонаторные преобразователи тоже находят применение при измерении интенсивности (токов) пучков.

Так в работе<sup>/5/</sup> сообщается о том, что весьма плодотворным для измерения параметров пучка в ускорителях оказались методы, основанные на возбуждении объемных резонаторов пролетающими через них сгустками заряженных частиц.

Для измерения тока пучка используется цилиндрический резонатор, пронизываемый пучком вдоль оси. Диаметр резонатора выбирается таким образом, чтобы его резонансная частота для колебания, когда электрическое поле направлено по оси датчика, и вариации поля по азимуту и вдоль оси отсутствуют, совпадала бы с частотой какой-либо гармоники тока пучка. При продольных размерах датчика 1-3 см и постоянной времени 0,3-1 нс достигнута чувст-

вительность около  $1 \text{ В/мА}$ , что на два порядка выше, чем у магнито-индукционных датчиков тока с теми же размерами. Настраивая резонатор на нечетную гармонику, можно получать сигнал, пропорциональный сумме токов двухкомпонентного пучка, а при настройке на четную гармонику - их разность. Аппаратурная либо программная обработка этих двух сигналов позволяет получить информацию одновременно об обоих компонентах тока.

Ввиду сложности калибровки такие датчики применяют в сочетании с магнито-индукционными датчиками <sup>/5, II/</sup>, используя последние для калибровки первых и получения разностного сигнала двухкомпонентного пучка. В выходном сигнале резонаторного датчика содержится информация не только об интенсивности пучка, но и о фазовом положении отдельных сгустков. Об использовании этой информации будет сказано ниже, в разделе об измерении средней энергии частиц.

Пример использования резонаторных датчиков для диагностики пучков на инжекторе синхрофазотрона показан в работах <sup>/10, II/</sup>.

Из сказанного выше, можно сделать следующие выводы. При наладке режимов работы ускорителей целесообразно использование ЦФ. В процессе работы линейного ускорителя как инжектора кольцевого ускорителя наиболее эффективно использование магнито-индукционных преобразователей (датчиков), тем более, что МИДы могут легко калиброваться, если предусмотреть в них дополнительную обмотку калибровки. Подавая в эту обмотку импульсы тока определенной величины и зная число ее витков, можно калибровать не только датчик, но и весь измерительный тракт, вплоть до ввода в ЭВМ.

Резонаторные датчики менее универсальны для измерения интенсивности, так как требуют пучок, модулированный по высокой частоте, что не всегда возможно (например, пучок с форинжектора). Для повышения чувствительности МИПов используют дополнительные обмотки обратной связи (трансформатор Хервурда), а также трансформаторы Хервурда с магнитным модулятором <sup>/12/</sup>.

Прогресс в области создания новых ферромагнитных материалов со сверхвысокой магнитной проницаемостью (новые сорта пермаллоя, аморфные сплавы и т.д.) и производства малозумящих линейных интегральных микросхем, позволяет надеяться, что магнито-

индукционные преобразователи станут действительно универсальными и широко применяемыми датчиками интенсивности пучков заряженных частиц.

## II. Измерение энергии и энергетического спектра

К энергетическим характеристикам импульсных пучков относятся 1) полную энергию сгустка или импульса, 2) максимальную и среднюю энергию частиц пучка, 3) энергетический спектр сгустка или импульса пучка.

Существуют различные методы измерения данных параметров:

1) Метод измерения по взаимодействию заряда частицы с внешними магнитными или электрическими полями. Приборы, основанные на этом методе, называются спектрометрами или анализаторами. Принцип действия магнитных и электростатических спектрометров изложен в литературе <sup>/3/</sup>.

В настоящее время созданы также анализаторы, в которых для отклонения и разделения частиц по энергиям используют высокочастотное поле (см. ссылку I63 в <sup>/3/</sup>).

Магнитные спектрометры - наиболее распространенные приборы для точных измерений максимальной и средней кинетической энергии и энергетического спектра пучков заряженных частиц. Точность измерения с помощью магнитных спектрометров может достигать 0,001%. Точность электростатических и высокочастотных анализаторов ниже и находится в пределах 1-5%. Для нашего случая этот метод неприемлем т.к. необходимо создавать специальное дополнительное оборудование, которое должно быть размещено на тракте инжекции и находится в вакууме. Кроме того, пучок должен отклоняться от тракта, т.е. нельзя измерять, не нарушая режим работы.

2). Эффективнее использовать резонаторные преобразователи, о которых говорится выше. Используя различные конструкции резонаторов и возбуждая их на разных гармониках частоты следования сгустков, а также используя обработку сигналов с помощью ЭВМ, можно измерять не только интенсивность и поперечное положение пучков, но также их среднюю скорость (энергию), длительность и форму сгустков, ширину энергетического спектра, распределение частиц по поперечному сечению (профиль) пучка, а также определить его оценивая распределение частиц по поперечным

фазовым плоскостям.

Как говорилось выше, в выходном сигнале резонаторного датчика содержится информация не только об интенсивности пучка, но и фазовом положении сгустков. Эту информацию используют для определения средней энергии частиц, измеряя разность фаз между выходными сигналами двух резонаторных датчиков, удаленных друг от друга на известное расстояние.

Абсолютные измерения с точностью до  $10^{-2}$  производятся на расстояниях, не превышающих  $(2\div 3) \beta\lambda$ .

При относительных измерениях расстояние увеличивают до  $(10\div 20) \beta\lambda$ , обеспечивая при этом точность до  $10^{-4}$ .

Для оценки длительности сгустков и ширины энергетического спектра используется набор узкополосных резонаторов, каждый из которых настроен на определенную гармонику пучка. Хотя при этом полностью теряется информация об относительных фазах гармоник, моделирование на ЭВМ измерительного процесса для сгустков случайной формы и длительности подтвердило эффективность этого метода.

В уже упоминавшихся работах /10,11/ описаны малогабаритные резонаторные датчики, размеры которых уменьшены за счет использования для измерений не цилиндрического, а тороидального резонатора. Особенностью конструкции датчиков является то, что резонатор отделен от вакуумного объема. Несмотря на ряд факторов, снижающих добротность, таких как наличие диэлектрической вставки малость зазора и другие, чувствительность датчика оказалась на уровне  $0,6\div 0,7$  В/мА, что дало возможность с помощью простой схемы подавления высокочастотных помех, применить его для измерений на пучках с токами  $\sim 20$  мкА и выше.

Были установлены на тракте инъекции синхрофазотрона два таких датчика: один (РД-1) непосредственно за вакуумным кожухом линейного ускорителя, другой (РД-2) - на расстоянии 21 м от него, за выравнивателем энергии и модулятором энергии.

С каждого датчика использовались два выходных сигнала. Один через высокочастотный усилитель-ограничитель и ступенчатый фазорегулятор подавался на фазовый мост, выходной сигнал с которого использовался для измерения величины модуляции энергии пучка в течение длительности импульса: второй выходной сигнал служил для получения информации об энергетическом спектре пучка (второй сигнал с РД-1 нес информацию только об интенсивности пучка). Измерительная система давала возможность контролировать параметры пучка не только собственно линейного ускорителя, но и в совокупности с выравнивателем и модулятором энергии.

3). В работе /13/ изложен способ индикации и контроля энергетического спектра пучка на выходе линейного ускорителя с помощью прозрачного индукционного датчика.

Измерительный датчик был установлен на расстоянии 10 м от выхода линейного ускорителя. В качестве датчика использовался цилиндрический пикап-электрод диаметром 90 мм, длина образующей 3 см. Схема измерения показана на рис. 2 .

Усилительный тракт схемы не содержит нормализации на величину пролетного тока ускоренных частиц. Форма импульса (как это можно видеть из работы /13/) изменяется за время инжекции. При наличии в схеме нормализующего элемента (например, АРУ) форма сигнала с пикап-электрода в еще большей степени будет отражать форму огибающей импульса в.ч. поля за время инжекции.

Описываемый метод измерения спектра не дает, конечно, представления о виде спектральной кривой, который можно получить, пользуясь классическим методом (например, магнитными спектрометрами), но он позволяет достаточно точно и, что немаловажно, оперативно обеспечить оптимальную настройку инжектора для согласования его по спектру с кольцом ускорителя.

Один из самых распространенных методов измерения энергии - это метод измерения частиц по времени пролета. Для импульсных пучков наносекундных длительностей и пучков, сгруппированных в сгустки, этот способ реализуется достаточно просто. На участке свободного дрейфа пучка на расстоянии  $l$  друг от друга устанавливаются два датчика, которые регистрируют моменты  $t_1$  и  $t_2$  прохождения сгустка или пуга сгустков. По измеренному интервалу времени определяют среднюю скорость частиц

$$\bar{v} = \frac{l}{t_2 - t_1} .$$



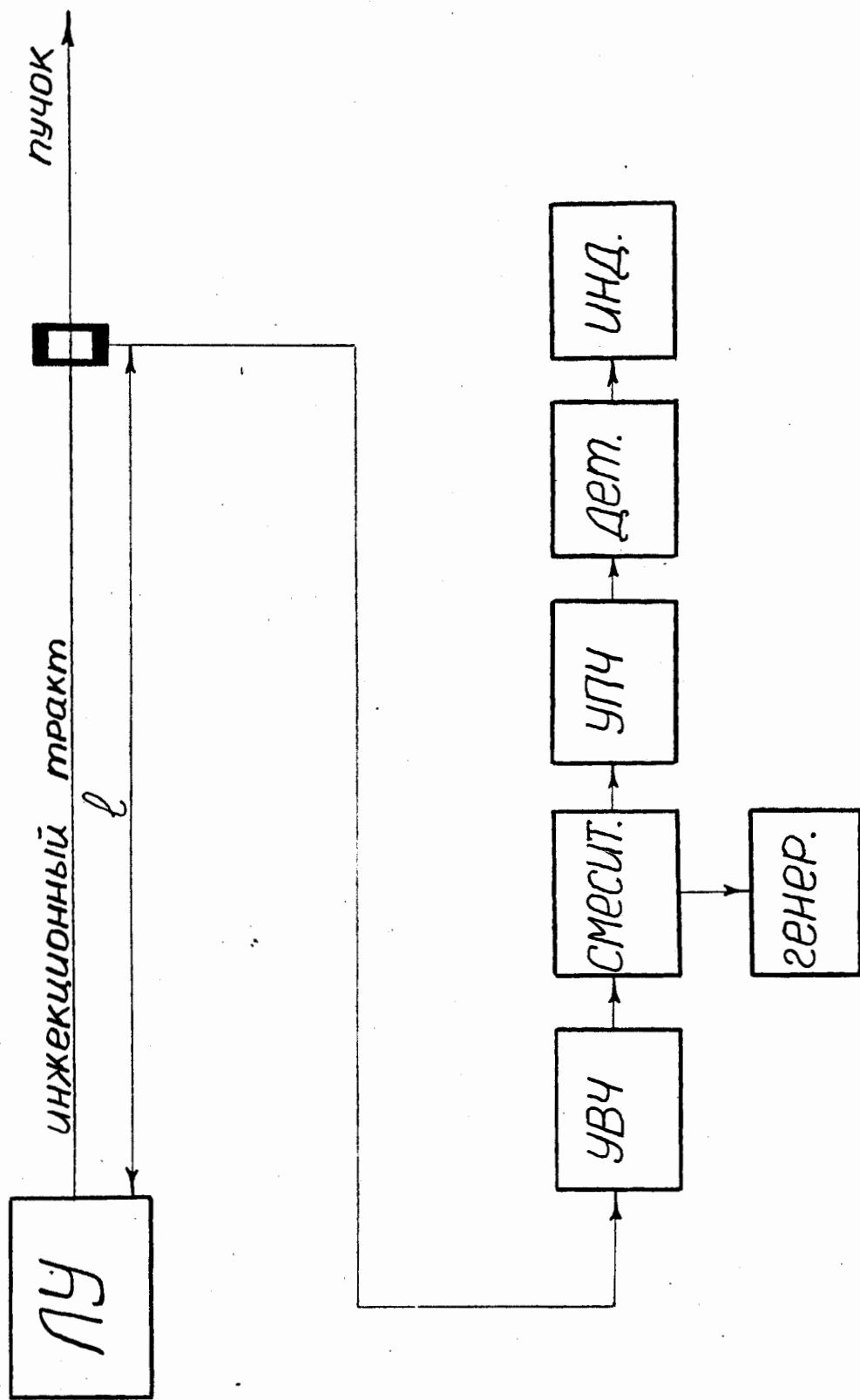


Рис. 2

В данных измерениях можно использовать любые преобразователи и детекторы коротких импульсов. Как говорилось выше, очень удобны в этом отношении резонаторные преобразователи, настроенные на частоту следования ступок или на одну из ее гармоник.

Отсюда можно сделать следующие выводы:

Для измерения энергетических характеристик пучка на ускорителях можно создавать специальные спектрометры, но это не всегда оправдано и возможно.

Измерение энергетических характеристик с помощью преобразователей, использующих излучение Вавилова-Черенкова, а также по пробегу и поглещению в веществе не получили широкого распространения.

Некоторое распространение получили сцинтилляционные преобразователи /II/. Однако, наиболее широкое распространение при измерении энергетических характеристик получили бесконтактные методы - резонаторные преобразователи /5,10,11/, индукционные преобразователи /13/.

### III. Измерение профиля и размеров пучков

Линейные профили пучка дают наиболее полную информацию об основных параметрах пучка частиц. Профиль представляет собой функцию распределения плотности тока по сечению пучка. Максимальное значение интеграла этой функции пропорционально току пучка. Через профиль пучка определяют центр тяжести и размеры пучка.

В качестве характеристики размера пучка используют размеры, которые охватывают любую задаваемую долю его интенсивности /14/. Во многих случаях не требуется детального распределения частиц в пучке, а достаточно проследить характер изменения его размеров. В этом случае для определения размеров пучка электронной аппаратурой интегрируют величину, которую получают в результате преобразования в электрический сигнал. Текущее значение интеграла непрерывно сравнивают со значениями  $N(0,5 - \alpha/2)$  и  $N(0,5 + \alpha/2)$  и измеряют интервал между моментами совпадений.

Обычно размеры пучка определяют как ширину профиля на полувысоте, т.е. при  $\alpha = 0,5$ . Средняя квадратическая амплитуда колебаний частиц равна полуширине функции профиля на уровне  $\alpha = 0,368$ . Для получения информации об изменении амплитуд больших и малых колебаний циркулирующих частиц размеры пучка определяют на двух и более уровнях.

Ионизационные профилометры применяют в основном для измерения

распределения плотности тока по сечению в кольцевых протонных ускорителях. Их применяют также на протонных накопителях и сильноточных бетатронах. Измерения профиля пучка можно проводить по синхротронному излучению, которое наблюдается, в основном, в ускорителях электронов. Эмиссионные и акустические профилометры применяют в ионопроводах накопительных колец, в каналах быстрого и медленного вывода и на линейных ускорителях (довольно редко). Указанные методы не нашли широкого применения в диагностике пучков на ускорителях и поэтому подробно здесь на рассматриваются.

#### Г). Коллекторные профилометры.

По степени воздействия на пучок профилометры на основе коллекторных преобразователей (зонды, экраны, щелевые приборы, цилиндры Фарадея) бывают непрозрачными или полупрозрачными. Основное достоинство коллекторных профилометров - сравнительная простота конструкции, а основной недостаток - поглощение всего пучка или его части на измерительном устройстве. Несмотря на то, что коллекторные профилометры постепенно вытесняются новыми, более перспективными методами измерения распределения плотности тока по сечению пучка, не оказывающими обратного воздействия на пучок, их до сих пор широко применяют на ускорителях и накопителях для настройки и вывода на оптимальный режим работы систем инжекции и проводки пучка на первых оборотах циклических ускорителей.

Метод зондов, заключающийся в том, что поперек пучка перемещается металлический электрод небольших размеров и измеряется ток, попадающий на этот электрод. С помощью зонда снимается усредненная картина распределения плотности тока. Усреднение зависит от размеров зонда (пространственное разрешение) и от скорости сканирования (временное) разрешение. Недостатки этого метода очевидны: необходима нормировка сигнала по интенсивности (чтобы от цикла к циклу изменение интенсивности не сказывалось на показаниях), необходимо сложное механическое дистанционно управляемое устройство перемещения (сканирования) зонда в вакууме. Кроме того, необходимо точное знание положения зонда.

На наш взгляд, для измерения профиля более эффективно применение многопроволочных датчиков с вертикальными и горизонтальными, изолированными друг от друга, проволочками, диаметр которых и опре-

измерения 20 мс, объем информации ИК 6 разрядных слов.

В последнее время появились прикладные телевизионные установки и телевизионные камеры на приборах с зарядовой связью (ПЗС). Преимущества телевизионных камер на основе ПЗС-матрицы перед обычными телевизионными камерами очевидны /17/. Монокристалл кремния имеет высокий квантовый выход в широком спектральном диапазоне, процесс сканирования изображения ведется под действием электрических управляющих импульсов низкого напряжения. Матрица ПЗС имеет высокое пространственное разрешение, потребляет малую мощность и удобна в эксплуатации благодаря своей компактности. К достоинствам ПЗС можно отнести также механическую прочность, стойкость к ударам и вибрациям, надежность, относительную дешевизну и длительный срок службы.

В работе /17/ описана цифровая передающая телевизионная камера на основе ПЗС-матрицы, предназначенная для диагностики параметров пучков заряженных частиц, работающая в ионной измерительной системе, сопряженной с ЭВМ. Приведены пороговые интенсивности для различных ядерных пучков, начиная с которых можно контролировать их параметры.

Из сказанного выше можно сделать следующие выводы:

Для измерения профиля пучка при настройке линейного ускорителя целесообразно пользоваться люминесцентными экранами с применением телевизионных камер на ПЗС-матрицах /17/.

В случае работы ЛУ совместно с кольцевым ускорителем желательно применение проволочных профилометров с прозрачностью 95-97,5% /16/.

#### IV. Определение положения центра тяжести пучка

Устройства определения положения пучка заряженных частиц на трактах инжекции наряду с другими устройствами индикации пучка существенны при запуске и эксплуатации линейных ускорителей. К наиболее разработанным и широко применяющимся преобразователям положения центра тяжести пучка (ЦТП) относятся разностные магнитоиндукционные измерители ЦТП, применяемые на линейных ускорителях.

В работе /3/ приведены схемы магнитоиндукционных измерителей ЦТП с двумя измерительными обмотками или с двумя каналами. Более оптимальны магнитоиндукционные измерители ЦТП с четырьмя обмотками, как это сделано в работе /18/.

Строго говоря, для определения положения центра тяжести пучка можно использовать измерительные преобразователи, которые используются при измерении интенсивности пучка и профиля (с некоторыми модификациями). Как уже говорилось в разделе, измерение профиля и размеров пучка, в работе /15/ кратко описан проволочный датчик, используемый в автоматизированной системе измерений и контроля основных параметров инжекционного комплекса синхрофазотрона. Информацию о профиле можно получить непосредственно на осциллографе, или, используя АЦП, на цветном мониторе. Информацию же о положении центра тяжести пучка можно определить, зная распределение плотности тока по сечению пучка в вертикальном  $n(y)$  и горизонтальном  $n(x)$  направлениях из выражений

$$y = \frac{y \cdot n(y) \, dy}{n(y) \, dy}$$
$$x = \frac{x \cdot n(x) \, dx}{n(x) \, dx}$$

Вычисления производятся на ЭВМ. Опишем систему для получения информации о профиле, положении и интенсивности пучка на инжекторе синхрофазотрона /15/, с последующей обработкой на ЭВМ СМ-3 и выводом на цветной монитор и плоттер.

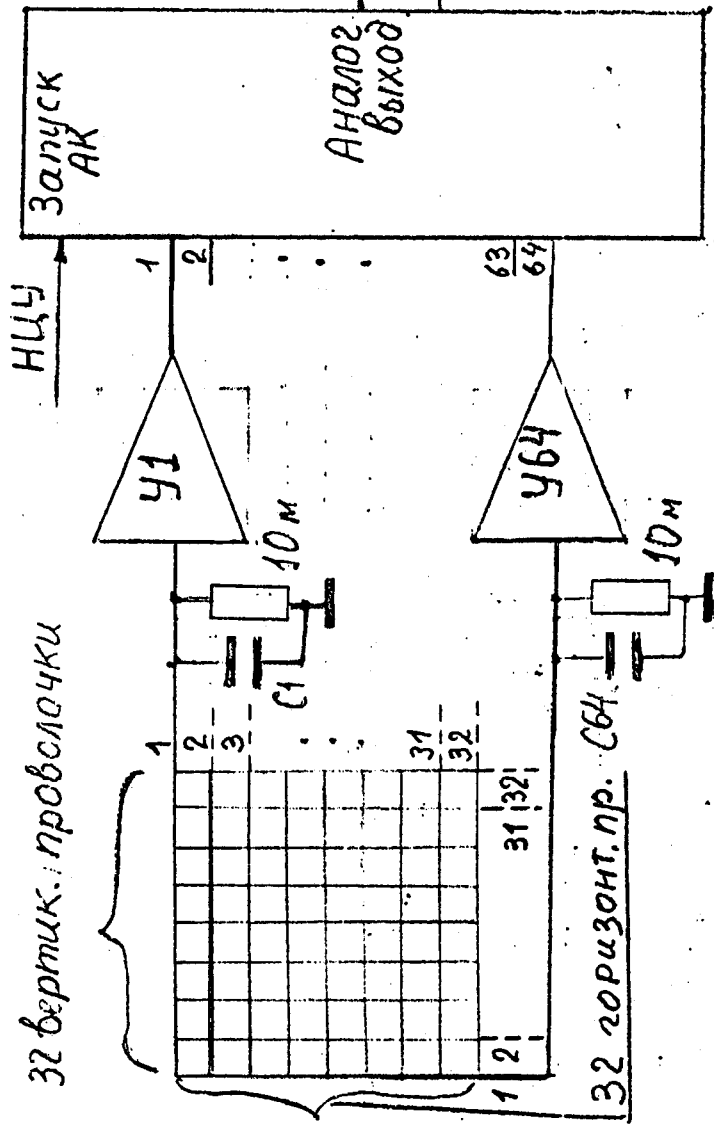
Блок схема электронной аппаратуры, установленной вблизи ионопровода инжектора и на пульте ЛУ-20 показана на рис.3. Как видно из рисунка, электронная аппаратура включает в себя профилометр, находящийся на ионопроводе, усилители с источниками питания (на рисунке не показаны) и аналоговый коммутатор, размещенные в корпусе "Вишня". На пульте находятся пассивные и активные крейты КАМАК, некоторые блоки которых находятся в составе измерительной системы. Профилометр размещен в стальном корпусе, в котором находятся 2 датчика (1-й -  $\phi$  проволочек 50 микрон, 2-й -  $\phi$  проволочек 100 микрон). Выбор того или иного датчика или вывод их из зоны действия пучка осуществляется как вручную, так и дистанционно (спульта) при помощи электропривода.

Информация с каждой проволочки выводится через контакт вакуумного разъема и поступает на входы усилителей, параллельно которым подключены запоминающие емкости, выходы этих усилителей соединены со входом аналогового коммутатора. Аналоговый коммутатор (АК) связан с пультом ЛУ-20 тремя кабелями: запускаящий (запуск АК), старт АЦП (64 запуска АЦП в цикле) и аналоговый выходной (соединяется со входом АЦП).

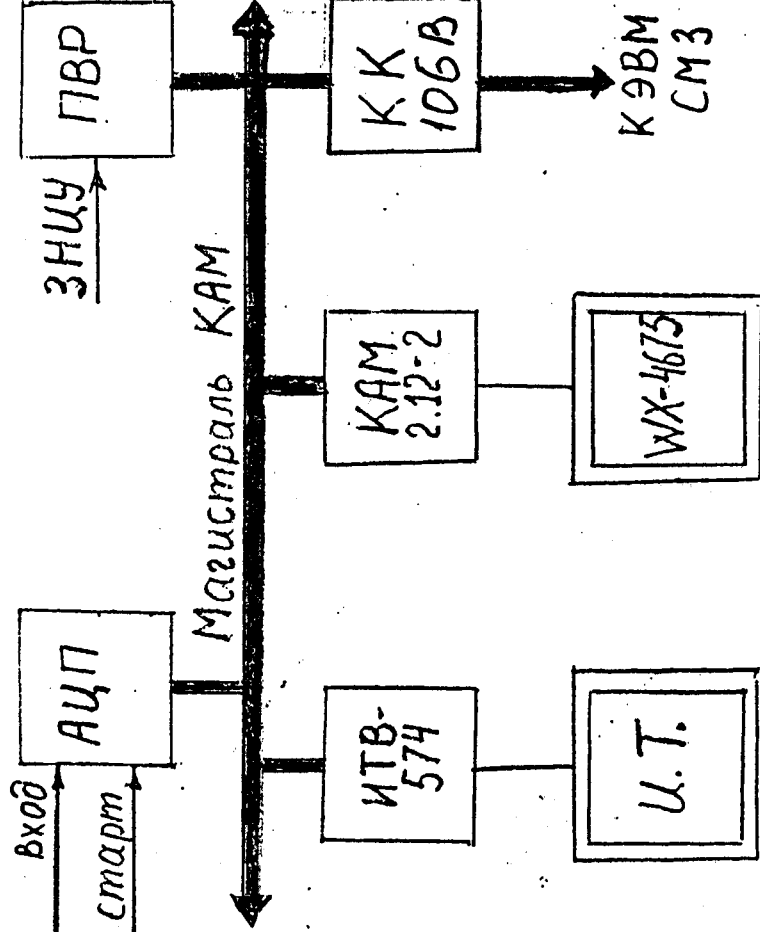
Система работает следующим образом.



32 вертикал. проводочки



Аппаратура на пульте ЛУ-20



Аппаратура вблизи анодпровода инжектора

Рис. 3

С приходом импульса начала цикла ускорения (запуск АК) запускается аналоговый коммутатор. Одновременно с ним, при наличии пучка на ионопроводе, остаточный заряд на проволочках запоминается емкостями памяти (С1+С64). Через время, равное длительности импульса инжекции (500 мксек), аналоговый коммутатор начинает опрос с каждого усилителя с передачей на АЦП, находящегося на пульте ЛУ-20.

Синхронизация работы электронной аппаратуры на пульте ЛУ-20 и программного обеспечения осуществляется по задержанному импульсу начала цикла ускорения (ЗНЦУ), фиксируемому параллельным входным регистром (ПВР).

На АЦП с коммутатора в каждом цикле поступает 64 раза (по числу проволочек) одновременно 2 импульса: аналоговый - информация с опрашиваемого усилителя и стартовый - для запуска АЦП. В системе используется двенадцатиразрядный АЦП типа САМ.4.04-1 (ЦИФИ, ВНР) с буферной памятью 64x12 разрядов.

Для оперативного представления информации применяется цветной телевизионный дисплей (ЦТ), подключенный к магистрали КАМАК через разработанный в Лаборатории высоких энергий интерфейс ИТВ-574. Документирование результатов производится с помощью печатающего устройства ДМ-180 и графопостроителя X-4675 (Watanabe, Япония), подключенный к магистрали КАМАК через параллельный выходной регистр САМ.2.12-2 (ЦИФИ, ВНР) и блок синхронизации. Электронная аппаратура в стандарте КАМАК подключена к общей шине ЭВМ СМ-3 с помощью крейт-контроллера (КК-106В).

Как видно из изложенного, задачи определения положений центра тяжести пучка можно успешно решать полностью прозрачными датчиками или датчиками с прозрачностью 95-97,5%.

#### У. Измерение эмиттанса пучка заряженных частиц

Состояние каждой частицы в любой момент времени в пространстве координат и импульсов характеризуется  $2n$  переменными,  $n$  из которых определяют положение частицы в пространстве обобщенных координат  $r_i$ , а других - характеризуют скорость движений по каждой степени свободы (обобщенные импульсы  $p_i$ ). Эта  $2n$  - мерная система координат называется фазовым пространством. В частности, в декартовой системе координат движение частиц полностью определено, если известны ее координаты  $X, Y, Z$  и компоненты импульса  $P_x, P_y, P_z$ , которые изображаются представляющей точкой в шестимерном фазовом пространстве некоторый, отличный от нуля, объем.

Концепция фазового пространства находит одно из практических применений при расчете интенсивности пучка частиц, впускаемых из инжектора в ускоритель. Устройство ввода инжектируемых частиц в ускоритель должно быть рассчитано и сооружено таким образом, чтобы объем фазового пространства, занимаемого выходящим пучком (эмиттанс), был по возможности близок к объему той части пространства, которая соответствует частицам, захватываемым ускорителем (акцептанс). Аналогичные вопросы возникают при рассмотрении "Каскадных" систем с переходом пучка из одного ускорителя в другой или накопительных системах, куда максимальные пучки поступают из специального ускорителя. Так как  $V_{\perp} = (2E)^{1/2} r'$ , где  $E$  - поперечная составляющая энергия частицы, а  $r'$  - наклон пучка к оси, для удобства обычно выражают через  $r$  и  $r'$ . В этом случае эмиттанс пучка  $\mathcal{E}$ , определяемый как площадь соответствующего сечения (горизонтального или вертикального) фазового объема, занятую представляющими точками пучка, деленную на  $\pi$ :

$$\mathcal{E} = \frac{1}{\pi} \int dr \cdot r'$$

Так как угловая расходимость пучка равна отношению поперечного и продольного импульсов, при сравнении эмиттансов пучков от различных источников используют нормализованные эмиттансы, учитывающие энергию пучка. Для получения инвариантного значения, пригодна для сравнения эмиттансов от различных источников заряженных частиц, значение измеренного эмиттанса умножают на какой-либо фактор, пропорциональный импульсу частиц. Это делают двумя способами. Первый состоит в том, что измеренное значение эмиттанса умножают на приведенный импульс частиц  $\Gamma_L$ :

$$v_n = \Gamma_L \cdot \mathcal{E}$$

где  $v_n$  - поперечный фазовый объем.

Второй способ основывается на том, что при низких энергиях заряженных частиц импульс (при заданной массе частицы) пропорционален корню из кинетической энергии. В результате получается инвариантный нормализованный эмиттанс:  $\mathcal{E}_H = \sqrt{T_K} \mathcal{E}$ , где  $T_K$  - кинетическая энергия.

Существующие методы измерения эмиттанса пучков заряженных частиц можно разделить на три класса: 1) метод определения эмиттанса по измеренным в нескольких точках поперечным сечениям; 2) метод, ос-

нованный на диафрагмировании отдельных частей пучка; 3) метод зондирования пучка. Этот метод не будем рассматривать в связи с его сложностью. Определять эмиттанс пучка можно посредством прозрачных, полупрозрачных и непрозрачных преобразователей.

В зависимости от способа определения угловых и пространственных координат пучка можно выделить различные модификации отмеченных выше методов.

1). Метод определения эмиттанса по измерениям в нескольких точках можно осуществить при помощи описанных выше профилометров /15/, установив их в разных местах тракта инжекции. В разделе III, где описываются методы измерения энергетических характеристик, говорится о том, что резонансные датчики можно использовать для измерений эмиттанса, следовательно, эмиттанс можно измерять полностью прозрачными датчиками.

2). Для метода, основанного на диафрагмировании отдельных частей пучка, можно использовать ламельные датчики, секционированные мишени или люминесцентные экраны совместно с телекамерами на ПЗС-матрицах /16/.

В настоящее время существуют идеи относительно более эффективного использования телекамер для измерения эмиттанса с вариацией тока, например, в магнитных линзах /19/. Вообще говоря, измерения эмиттанса довольно сложная и громоздкая задача, связанная с большим объемом расчетов. Наличие ЭВМ позволяет решать успешно эту задачу.

В заключение можно сказать, что диагностика пучков заряженных частиц на ускорителях успешно развивается по мере их модернизации и создания новых. Для диагностики пучков на с-тау фабрике применимы методы, используемые для диагностики пучков на ускорителях любых типов. Расширенная диагностика пучков позволяет создавать системы сбора информации и управления ускорителями заряженных частиц, о чем говорят следующие публикации /20,21,22/. Продолжает развиваться диагностика пучков с помощью телевизионной техники на основе ПЗС-структур. Так, например, в ЛВЭ была разработана система на основе ПЗС и проведены эксперименты по исследованию пространственных характеристик пучков синхрофазотрона /23,24/. В ЛВЭ также разрабатываются индукционные датчики и аппаратура для измерения интенсивности пучка, основанные на выделении и измерении 2-ой гармоники. Датчик и аппаратура в этом случае аналогичны датчику и

и аппаратуре прибора, описанного в работе /25/. Применение такого рода измерителей весьма эффективно при измерениях медленно меняющихся интенсивностей пучков (например, в основном кольце с-тау фабрики).



## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. JINR C-TAU factory. Proceedings of Workshop on JINR C-TAU factory. JINR E 1, 9, 13-92-98. Dubna, 1992.
2. E.A.Perelstein, V.S.Alexandrov, V.K.Antropov et al ... JINR TAU-charm factory.stady. JINR E9-92-259, Dubna, 1992.
3. Москалев В.А., Сергеев Г.И., Шестаков В.Г. Измерение параметров пучков заряженных частиц. М., Атомиздат, 1980.
4. Арменский Е.В. и др. Труды III Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Т. 2, М., "Наука", 1973, с. 35.
5. Елян В.В. Труды VI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Т. I, Дубна, ОИЯИ, 1979, с. 326.
6. Рыбин В.М. Труды VII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Т. II, Дубна, ОИЯИ, 1981, с. 278.
7. Воеводин М.А., Сайфулин Ш.З. Препринт ОИЯИ, 9-4834, Дубна, 1969.
8. Воеводин М.А. Сообщение ОИЯИ, 10-4600, Дубна, 1969.
9. Сайфулин Ш.З. Сообщение ОИЯИ, 9-5718, Дубна, 1971.
10. Воеводин М.А. и др. Препринт ОИЯИ, P9-11089, 1977.
11. Безногих Ю.Д. и др. Препринт ОИЯИ, P9-11858, 1977.
12. Сиколенко В.Ф. Препринт ОИЯИ, 9-5817, Дубна, 1977.
13. Безногих Ю.Д., Воеводин М.А. Препринт ОИЯИ, 9-5253, Дубна, 1970.
14. Кузьмин А.А. и др. Труды III Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Т. II, М., "Наука", 1973, с.144.
15. Безногих Ю.Д., ..., Сайфулин Ш.З. Труды X Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Т. I, Дубна, ОИЯИ, 1987, с.68.
16. Гусак А.А. и др. Препринт ИФВЭ 85-52, Серпухов, 1985.
17. Буриев Н.Т., ..., Сайфулин Ш.З. Сообщение ОИЯИ, P13-87-396, Дубна, 1987.
18. Евдокимов Н.Н. и др. Сообщение ОИЯИ, 13-82-221, Дубна, 1982.
19. Ross M.C. e.a. SLAC-PUB-4278, Stanford, March, 1982.
20. Системы электроники и управления ускорителей. В кн. "Труды VIII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Т. II, Дубна, ОИЯИ, 1983.

21. Системы управления ускорителями. В кн. "Труды IX Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц". Т. I, Дубна, ОИЯИ, 1985.
22. Системы управления и контроля ускорителей. В кн. "Труды X Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц". Т. I, Дубна, ОИЯИ, 1987.
23. Системы измерения и управления. В кн.: Тезисы докладов XII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Москва, ИТЭФ, 1990, с. 2.
24. В. Цамбел и др. Сообщение ОИЯИ. Р9-91-301, Дубна, 1991.
25. Воеводин М. А. и др. Препринт ОИЯИ. P13-91-424, Дубна, 1991.