

**И Н С Т И Т У Т
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СОАН СССР**

ПРЕПРИНТ И Я Ф 75 - 77

**В. Ф. Веремеенко, Н. С. Диканский, А. С. Калинин,
М. М. Карлинер, Б. А. Лазаренко, А. А. Литвинов,
А. С. Медведко, В. Н. Останин, В. В. Пархомчук,
Б. Н. Сухина, В. П. Черепанов**

**НАКОПИТЕЛЬ ПРОТОНОВ НАП - М.
III. УСКОРЯЮЩАЯ СИСТЕМА.
КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ ПУЧКА**

Новосибирск

1975

НАКОПИТЕЛЬ ПРОТОНОВ НАП-М

III. УСКОРЯЮЩАЯ СИСТЕМА. КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ ПУЧКА

В.Ф.Веремеенко, Н.С.Диканский, А.С.Калинин,
М.М.Карлинер, Б.А.Лазаренко, А.А.Литвинов,
А.С.Медведко, В.Н.Останин, В.В.Пархомчук,
Е.Н.Сухина, В.П.Черепанов

А Н Н О Т А Ц И Я

Перестройка частоты в ускоряющей системе НАП-М осуществляется по сигналу датчика Холла, пропорциональному величине магнитного поля. Точная подстройка частоты осуществляется по радиальной и фазовой координатам ручки.

Контроль параметров пучка состоит в измерении положения равновесной орбиты и тока пучка. Ток пучка измеряется при впуске частиц, в процессе ускорения, а также во время эксперимента в отсутствие бунчировки пучка. В системах используются электростатические датчики, пояса Роговского и магнитомодуляционный датчик тока.

Задача перестройки частоты ускоряющего напряжения при ускорении протонов в накопителе существенно облегчает требования, предъявляемые к характеристикам магнитной системы и системы питания электромагнита, если использовать управление ускоряющей системой от магнитного поля и обратную связь по пучку.

Ускоряющая система накопителя НАЦ-М (рис. I) включает в себя задающие генераторы Г-1 + Г-3, схемы управления, усилитель мощности и резонатор. Последний представляет собой одновитковый трансформатор с ферритовым сердечником. Задающим элементом для перестройки частоты генератора служит датчик Холла ($B(t)$). Запоздывание его сигнала, возникающее в цепях управления и фильтрах, компенсируется добавлением сигнала производной поля ($\dot{B}(t)$), который снимается с дополнительной обмотки, заложеной в одном из магнитов накопителя. Подобная компенсация запаздывания, вызванного одним фильтрующим RC -звеном, оказывается полной, если отношение коэффициентов передачи K_1 и K_2 каналов $B(t)$ и $\dot{B}(t)$ равно постоянной времени фильтра. Сопряжение законов изменения частоты и поля осуществляется делителем напряжения (ЦАП), регулируемым от ЭВМ.

Более точная подстройка частоты осуществляется по радиальной (рис. I) координате пучка. Для получения сигнала подстройки частоты используется дифференциальный пикап-электрод, включенный в

канал обработки, аналогичный каналу измерения положения равновесной орбиты (см. ниже), Напряжение с его выхода, нормированное на ток пучка и пропорциональное радиальной координате центра тяжести сгустка, поступает на подстройку частоты через интегрирующий усилитель и обеспечивает компенсацию отклонения координаты примерно в $16 \cdot 10^3$ раз для "нулевой" частоты возмущений и в 40 раз на частотах 50 + 150 Гц. Большое значение коэффициента усиления схемы для медленных отклонений позволило снизить требования к точности согласования законов перестройки поля и частоты.

Подавление быстрых ($\Omega \gg \Omega_{\text{синхр}}$) возмущений в частоте и обеспечение благоприятного захвата инжектируемых частиц в режим ускорения осуществляется цепью фазовой автоподстройки частоты. Датчиком фазового положения пучка в этой цепи служит интегральный (Σ) пикап-электрод, сигнал с которого обрабатывается широкополосным фазовым (синхронным) детектором. Рабочая полоса частот этого канала равна примерно 10 кГц.

Частота ускоряющего напряжения представляет собой разность частот генераторов Г-1, Г-2 (рис. 1). Для линеаризации и стабилизации характеристик перестраиваемого генератора Г-1 в схеме использован преобразователь частоты в напряжение, выходной сигнал которого сравнивается с управляющими сигналами, и их разность поступает на перестройку частоты. Преобразователь обеспечивает относительную точность перестройки частоты $\sim 5 \cdot 10^{-3}$. Оказалось удобным разделение каналов быстрой (по фазе пучка, Г-2) и медленной (по полю и координате пучка Г-1) перестройки частоты, поскольку в этом случае отсутствует паразитное влияние быстрых флуктуаций частоты гетеродина на качество работы схемы измерения положения пучка.

Использование описанных цепей управления перестройкой частоты позволило снизить ограничение на пульсации поля до уровня $(1-2) \cdot 10^{-4}$ во всем диапазоне энергий. Петли обратной связи устойчиво работают, если число частиц на орбите превышает $3 \cdot 10^8$ (ток на энергии инжекции около 20 мкА).

Измерение положения орбиты пучка по радиусу (X) и вертикали (Z) производится в 10 сечениях вакуумной камеры при помощи пикап-электродов-электростатических датчиков положения пучка (рис. 2). Электроды датчика изготовлены из медной трубы и имеют треугольную проекцию на плоскость, в которой производится измерение положения пучка /2/. Погрешность юстировки центров датчиков относительно оси равновесной орбиты не превышает $\pm 0,2$ мм в промежутке охлаждения пучка /1/ и $\pm 0,3$ мм в остальных местах. Нелинейность и разброс коэффициентов передачи датчиков не превышает $\pm 13\%$ (± 4 мм) при отклонении пучка на 30 мм от центра датчика.

Сигналы с электродов датчика поступают на истоковые повторители (рис. 3), на выходе которых производится их вычитание с помощью трансформатора с объемным витком (Δ -канал). Схема обеспечивает подавление синфазного сигнала (точность измерения координаты см. ниже) приблизительно в 250 раз в диапазоне частот 0,2-10 мГц амплитуде сигналов до 1 в. Суммовый сигнал (Σ) снимается с общей коллекторной нагрузки повторителей. Оба канала имеют коэффициент передачи со входа на 50-омный кабель по порядку единицы.

Для помещения электростатического и геометрического центров датчика производится балансировка емкостей электродов. При

балансировке на них подается калибровочный сигнал через конденсаторы C_1 и C_2 (рис.3), равенство емкостей которых обеспечивается подстройкой. Парное выравнивание емкостей моста, образуемого конденсаторами $C_1 \div C_4$, производится поочередно при перемене положения плеч моста (ключи K_{12} и K_{13}). При этом достигается равенство емкостей $C_1 = C_2$ и $C_3 = C_4$ с точностью до величины, обратной коэффициенту подавления синфазного сигнала ($K_{сф}$). Тогда погрешность определения электрического центра датчика есть:

$$\Delta x \approx R_3 / K_{сф} = 35/250 = 0,14 \text{ мм}$$

где $R_3 = 35$ мм – радиус кривизны поверхности электродов. Для калибровки коэффициента передачи системы контрольный сигнал подается на один электрод.

Обработка суммарного (Σ) и разностного (Δ) импульсных сигналов ведется на первой гармонике частоты обращения пучка и состоит в нормировке Δ – сигнала на ток пучка (Σ) и синхронном детектировании нормированного сигнала. Опорным напряжением для синхронного детектора служит Σ – сигнал. Для выделения первой гармоники используется двойное преобразование частоты

($f_{пр1} = 20$ МГц, $f_{пр2} = 145$ КГц), а в качестве первого гетеродина с частотой $20,0$ МГц + $f_{обр}$ – генератор Г-И ускоряющей системы (рис.1). Нормировка и синхронное детектирование сигнала

ведутся на второй промежуточной частоте. Для нормировки использован принцип деления по схеме АРУ (автоматической регулировки усиления). Ее динамический диапазон по входному сигналу

(U_{max} / U_{min})_{вх} $\approx 5 \cdot 10^3$ при погрешности нормировки Δ – канала $\pm 5\%$. Минимальное число частиц, при котором осуществляется

нормированное на ток пучка измерение координаты, составляет $(1-3) \cdot 10^8$ частиц. Динамический диапазон сигналов на выходе син-

хронного детектора составляет около 10^3 и ограничивается снизу дрейфом нуля, величина которого эквивалентна смещению пучка около $0,1$ мм. При числе частиц в пучке $(4-5) \cdot 10^9$ разрешение системы составляет около $0,5$ мм смещения пучка.

Для удобства измерений и наблюдения профиля равновесной орбиты датчика поочередно опрашиваются при помощи таймера и высокочастотных транзисторных ключей. Период опроса датчиков – 35 мсек. Выходное напряжение синхронного детектора подается на АЦП для ввода сигналов в ЭВМ и на осциллограф для визуального наблюдения.

Измерение импульсного тока в канале инжекции и в накопителе осуществляется двумя индукционными датчиками, работающими в режиме трансформатора тока (пояс Роговского). Для увеличения чувствительности и расширения полосы пропускания датчик подключен ко входу каскада с общей базой /3/. Малое входное сопротивление каскада позволяет иметь при заданной постоянной времени малое число витков обмотки. При этом повышается чувствительность устройства и расширяется рабочая полоса частот (за счет сдвига вверх по частоте резонансов обмотки). Датчик, выполненный таким образом, имеет время нарастания выходного сигнала 2 нсек, а низкочастотную постоянную времени – 1 мсек.

Сигнал датчика интегрируется на емкости дополнительного контура (с периодом много большим длительности импульса тока). Амплитуда возникших при этом колебаний в контуре пропорциональна числу частиц в пучке. Полученный сигнал усиливается, запоминается в схеме емкостной памяти с МОП-транзисторами и измеряется цифровым вольтметром. Схема памяти и вольтметр синхронизированы с моментом инжекции. Погрешность измерения числа частиц

составляет около 5% при числе частиц в импульсе $2 \cdot 10^{10}$.

Для измерения среднего тока пучка в накопителе служит магнитомодуляционный датчик, который представляет собой магнитный усилитель, работающий в режиме удвоения частоты модуляции /4/. Частота модуляции равна 3 кГц. Датчик состоит из двух кольцевых пермаллоевых сердечников. Ток, проходящий сквозь кольца, подмагничивает пермаллой, в результате чего на выходе датчика появляется вторая гармоника частоты модуляции.

Сигнал второй гармоники усиливается избирательным усилителем и выделяется синхронным детектором. Особое внимание при разработке датчика уделялось его защите от внешних магнитных полей /5/ (при токе пучка 100 мкА напряженность измеряемого поля в сердечнике составила около 10^{-10} Г/л). Датчик помещен в двухслойный экран из отожженного пермаллоя. Помехи от паразитных токов, протекающих по металлической вакуумной камере, существенно уменьшены благодаря изолирующему разрыву из керамики (рис.4). Для повышения чувствительности датчика потребовалась также определенная работа по оптимизации формы модулирующего тока датчика.

В результате удалось получить разрешение прибора по току около 10 мкА. Диапазон измеряемых токов пучка составляет 100 мкА + 30 мА при погрешности 2 + 3% без учета дрейфа нуля. Дрейф нуля измерителя не превышает 5-10 мкА за час работы.

Заряд сфокусированного пучка измеряется также электростатическим датчиком (Σ -пикап-электродом). Если часть орбиты свободна от частиц, то сигнал пикап-электрода (рис.5) содержит "провисание", величина которого пропорциональна заряду, циркулирующему в накопителе. В измерителе используется широкополосный усилитель с автоматическим переключателем коэффициента усиления. Переключение осуществляется ступенями через 10 дБ в шести транзисторных дифференциальных каскадах 6 и позволяет существенно расширить динамический диапазон измеряемых сигналов.

Погрешность измерения числа частиц не превышает 10% в диапазоне $10^8 - 10^{11}$ частиц.

В заключение авторы благодарят Н.И.Андреева, В.И.Загородникова, В.Д.Мелешина и А.В.Семенова за участие в работе.

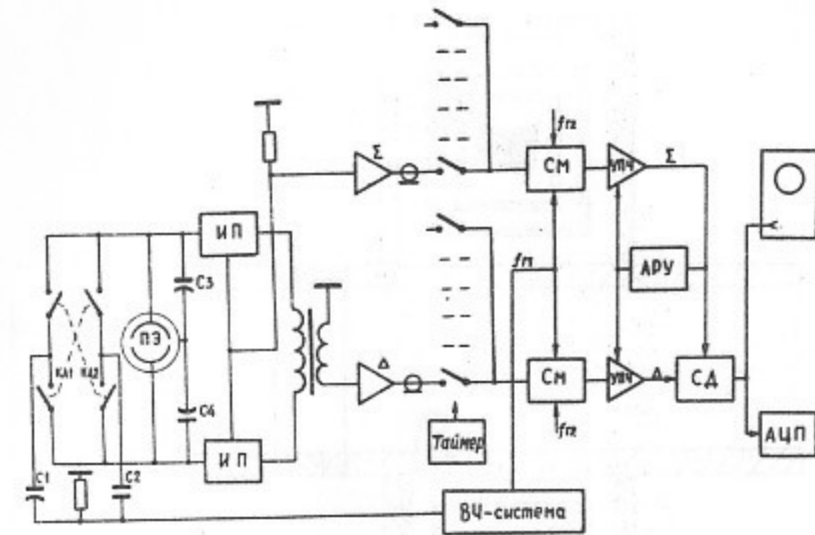
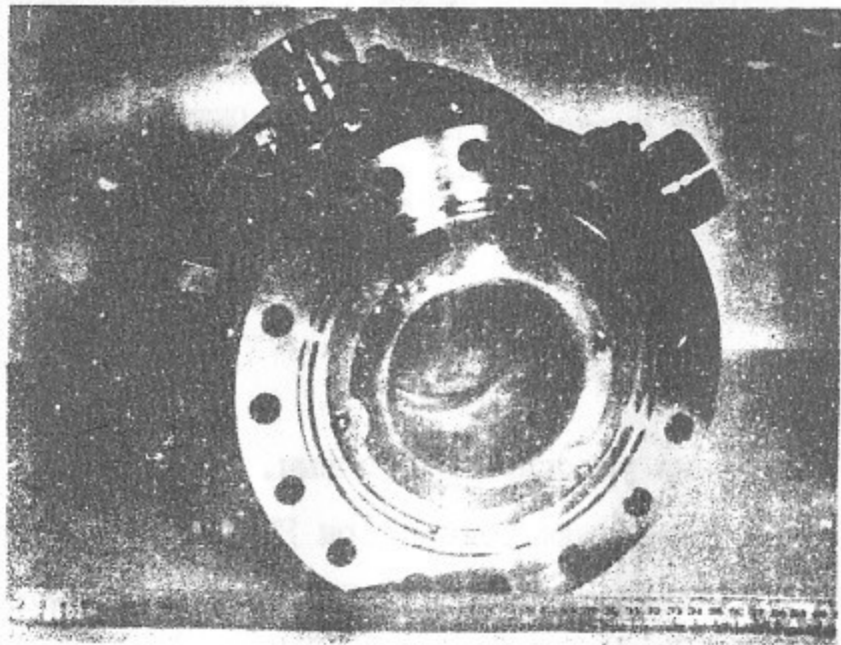


Рис.3. Блок-схема устройства для измерения равновесной орбиты.
 ПЭ - пикап электрод; ИП - истоковый повторитель;
 СМ - смеситель частот; УИЧ - усилитель промежуточной частоты; СД - синхронный детектор; Σ - усилители канала суммарного сигнала; Δ - усилители канала разностного сигнала.

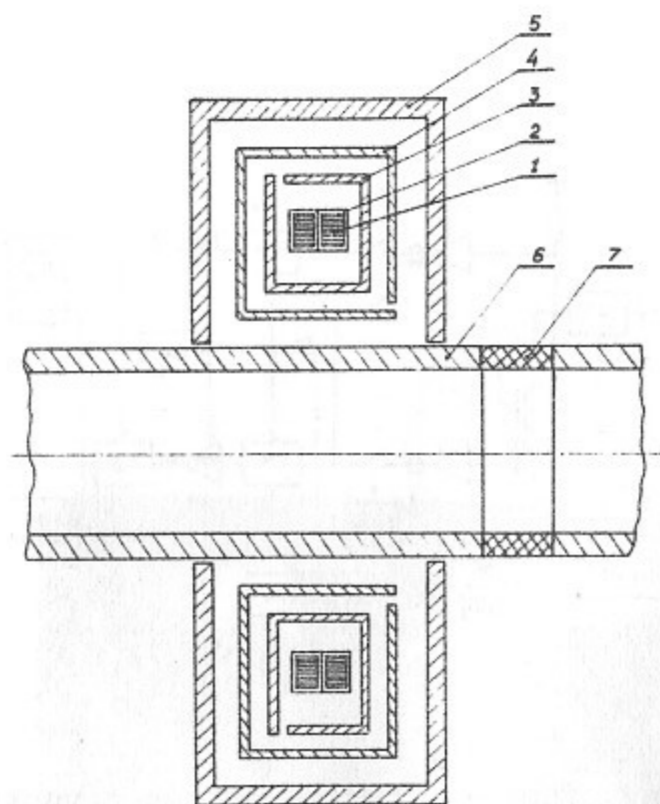


Рис.4. Магнитомодуляционный датчик.

1 - Магнитопровод; 2 - обмотки; 3, 4 - экраны пермал-
 лоевые; 5 - экран стальной; 6 - вакуумная камера;
 7 - диэлектрический зазор.

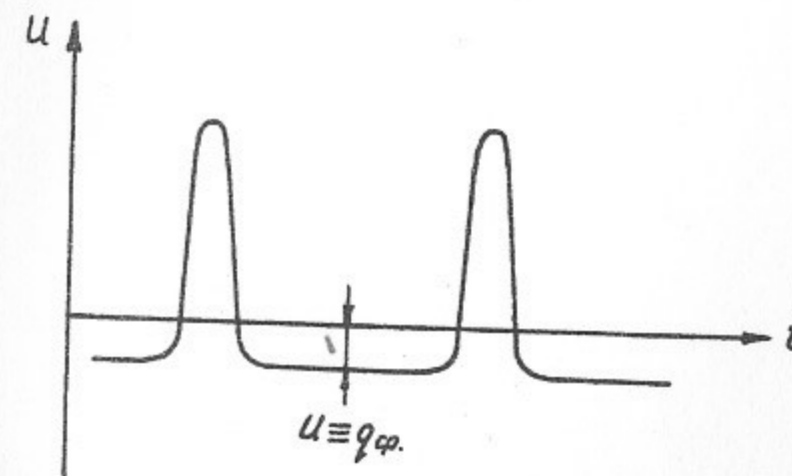


Рис.5. К измерению числа частиц в сгунчированном пучке.

Работа поступила 21 мая 1975г.

Ответственный за выпуск Г.А.Спиридонов.

Подписано к печати 1.9-75г. МН 07460

усл. 0,95 печ.л. тираж 200 экз. бесплатно.

Заказ № 77

Отпечатано на ротапинтере ИЯФ СО АН СССР, пр.