

Головная электроника для системы подавления резистивной неустойчивости пучка в I ступени УНК

С.А.Атрощенко, Ю.Л.Владыкин, С.Э.Меркер, М.С.Михеев
ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий, Протвино, Россия

Введение

Взаимодействие пучка с импедансом вакуумной камеры приводит к увеличению амплитуды поперечных бетатронных колебаний. Инкремент поперечной неустойчивости зависит от предыстории поведения пучка, величины и характера поперечного импеданса вакуумной камеры, интенсивности пучка.

Наиболее неустойчивые линии резистивной неустойчивости находятся на частотах $(Q - k) \cdot \omega_s$, где ω_s — угловая скорость синхронной частицы, k — целое, Q — частота бетатронных колебаний пучка.

Расчетная величина инкремента резистивной неустойчивости в I ступени УНК для низших мод когерентных колебаний достигает $0.14 \cdot \omega_s$. Для частот выше 20 кГц неустойчивость может быть подавлена за счет разброса по бетатронным частотам (1). Для стабилизации поперечного движения пучка в I ступени УНК была разработана система подавления резистивной неустойчивости (далее СПРН).

Принципы построения СПРН описаны в [1]. Схемотехника обоих каналов электроники (вертикального и радиального) полностью идентичны. Для подавления резистивной неустойчивости необходимо сформировать в толкателях токовый широкополосный сигнал, в котором основная мощность приходится на гармонические составляющие $\omega_n + (Q - k) \cdot \omega_s$, где ω_n — угловая скорость медленной волны, на которой развивается неустойчивость.

Особенностями головной электроники являются:

- широкий динамический диапазон,
- длинный кабель,
- присутствие на входе помех, в том числе сигнал группировки пучка,
- радиационные условия.

С датчика положения пучка на вход блока головной электроники поступают два сигнала, преобразованные входным трансформатором:

- первый $\sim I$, в дальнейшем называемый Σ , несет информацию об интенсивности пучка и используется как опорный в блоке головной электроники;
- второй $\sim I \cdot a$, в дальнейшем Δ , представляет собой дипольный момент пучка, здесь I — ток пучка, a — смещение пучка относительно оси датчика.

Набор модулей блока головной электроники по расположению разделен на две части, расположенных в тоннеле УНК и в зале электроники. Вследствие большого затухания сигнала в длинном кабеле (80 дБ/км для сигнала с частотой 200 МГц) передача его наверх осуществляется на промежуточной частоте 20 МГц.

Модули, расположенные в тоннеле, размещаются в непосредственной близости от датчика положения пучка, в так называемой “технологической нише”. Здесь происходит первичная обработка сигналов, их усиление, фильтрация, первое преобразование спектра. Сигнал промежуточной частоты передается наверх, где происходит его дальнейшая обработка в модулях зала электроники. Далее сигнал поступает на вход блока цифровой обработки. В блоке цифровой обработки сигнал оцифровывается и фильтруется от гармоник частоты обращения, присутствие которых может вызвать насыщение оконечных каскадов системы обратной связи. Там же организована задержка сигнала для выполнения фазовых соотношений между пучком и воздействующим на пучок токовым сигналом и определяется форма результирующего воздействия. Преобразованный в аналоговый вид сигнал подается в тоннель УНК на вход мощного широкополосного усилителя, формирующего ток в толкателе, который является исполняющим устройством СПРН.

1. Определение исходных данных для блока головной электроники

В качестве датчиков положения центра тяжести пучка будут использованы датчики типа Strip-Line. Исходя из геометрических размеров датчиков ($r = 35$ мм — средний радиус камеры, $l = 180$ мм — длина полоска, $h = 10$ мм — высота полоска над внутренней поверхностью камеры, $d = 40$ мм — ширина полоски), его продольный импеданс определяется соотношением

$$Z_t = 60 \cdot \ln(r/(r - h)) \cdot \sin(2\pi l/\lambda) = 13,7 \text{ Ом},$$

здесь $\lambda = 1500$ мм — длина волны 200 мГц компоненты сигнала, для которой вычисляется импеданс. Суммарный импеданс двухполоскового датчика равен $2 \cdot Z_t$, а его чувствительность — поперечному смещению пучка: $S = 2 \cdot Z_t/r = 0,78$ Ом/мм. Сигнал с датчика положения пучка в режиме с фиксированной мишенью представляет собой набор пакетов импульсов с частотой заполнения 200 мГц, промодулированных огибающей бетатронных колебаний. Число пакетов равно 12, т.е. числу цугов, заполняющих орбиту УНК с интервалом 0,6 мкс между ними. Требуемый динамический диапазон определяется снизу минимальной чувствительностью системы и равен 0,01 мм, а сверху максимальным смещением замкнутой орбиты 10 мм. Амплитуда гармоники 200 мГц в спектре сигнала с датчика положения пучка составляет 0,4 от пикового тока пучка. Таким образом, для случаев с минимальной интенсивностью, равной 10^9 (ток банча 80 мА) и максимальной интенсивностью, равной $5 \cdot 10^{10}$ (ток банча 4 А) диапазон для суммарного сигнала составит от 230 мВ до 11,5 В, а для разностного — от 250 мкВ до 12,4 В. Реально интенсивность банчей меняется не более чем в три раза, и динамический диапазон для Σ -канала принимаем равным 30 дБ, а для Δ -канала — 70 дБ. Выбранная ширина полосы 3 мГц достаточна для независимой коррекции отдельного цуга. При разработке блока головной электроники важное внимание было уделено фазовой линейности тракта.

2. Схемотехника тракта головной электроники

Головная электроника представляет собой схему супергетеродинного типа с синхронным детектированием по второй промежуточной частоте. Динамический диапазон Δ — канала составляет 70 дБ по уровню — 1 дБ. Схемотехнические решения

(рис.1) рассмотрим на примере Δ -канала, и где это необходимо, отметим различия между Δ - и Σ -каналами. Сигнал с датчика положения пучка попадает на вход 3-звенного полосового фильтра ПФ, с полосой пропускания $\Delta f = (200 \pm 3)$ МГц по уровню -3дБ. Он представляет собой три четвертьволновых полосковых звена с емкостной связью между ними. Для уменьшения габаритов фильтра использованы укорачивающие конденсаторы. Отфильтрованный сигнал поступает на вход четырехступенчатого аттенюатора А, позволяющего ослабить амплитуду сигнала в пределах от 10 до 40 дБ. Каждая ступенька обеспечивает ослабление сигнала на 10 дБ. Предусмотрено дистанционное управление аттенюатором. Четырехбитное слово, полученное по кабелю из зала электроники, преобразуется в управляющий ток PIN-диодов, на основе которых построен аттенюатор.

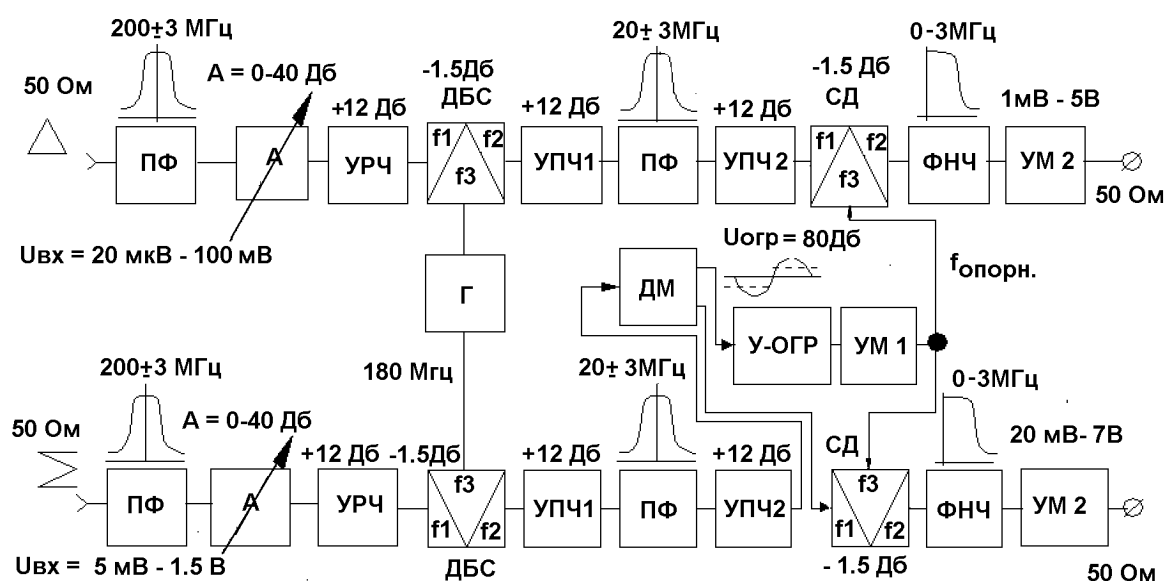


Рис. 1: Схема блока головной электроники. А — аттенюатор, ПФ — полосовой фильтр, УРЧ — усилитель радиочастоты, ДБС — двойной балансный смеситель, УПЧ — усилитель промежуточной частоты, ФНЧ — фильтр низкой частоты, УМ — усилитель мощности, Г — гетеродин, У-ОГР — усилитель-ограничитель, СД — синхронный детектор, ДМ — делитель мощности.

Далее происходит усиление сигнала на 12 дБ усилителем радиочастоты УРЧ, выполненным на основе схемы с общим затвором. Первое преобразование частоты осуществляется в двойном балансном смесителе ДБС, в результате которого спектр сигнала перемещается в область 20 МГц. Гетеродин Г, представляющий собой активную трехточку с резонансным контуром в цепи затвора, вырабатывает сигнал частотой 180 МГц и мощностью 100 мВт. Сигнал гетеродина после усиления по мощности каскадом, выполненным по схеме с общим истоком, попадает на балансные смесители Δ - и Σ -каналов. После выделения разностной частоты 20 МГц балансным смесителем ДБС сигнал подается на вход усилителя промежуточной частоты УПЧ1 с коэффициентом усиления 12 дБ. Выход усилителя соединен со входом полосового фильтра с полосой пропускания $\Delta f = (20 \pm 3)$ МГц, построенного на сосредоточенных элементах по П-образной схеме. Сигнал промежуточной частоты поступает по кабелю в зал

электроники. Потери в кабеле компенсируются усилителем промежуточной частоты УПЧ2 по схемотехнике аналогичным усилителю УПЧ1. Сигналы Δ - и Σ -канала детектируются синхронным детектором СД. В качестве опорной частоты используется часть сигнала Σ -канала, снятого с делителя мощности. Чтобы исключить влияние изменения интенсивности пучка на уровень сигнала опорной частоты, т.е. сигнала Σ -тракта, применяется усилитель-ограничитель У-ОГР, построенный на двух последовательно включенных операционных усилителях с ограничением по уровню 80 дБ. Результирующий сигнал с полосой от 0 до 3,5 мГц поступает на вход фильтра низкой частоты ФНЧ 3-го порядка, в котором обрезаются высшие паразитные гармоники. ФНЧ представляет собой лестничный фильтр с линейной фазой. Для согласования выходного сигнала со входом блока цифровой обработки, входной импеданс которого составляет 1 кОм, служит эмиттерный повторитель, собранный по двухполупериодной схеме.

3. Испытание прототипа головной электроники

Для проверки работоспособности головной электроники были проведены испытания на пучке 200 мГц в У-70 (рис.2). В качестве датчика положения пучка использовался широкополосный Strip-Line, расположенный на 116-й полуоси кольцевого синхротрона. Чувствительность этого датчика поперечному смещению пучка составляет 0,38 Ом/мм. Теоретически рассчитанный продольный импеданс датчика составляет 30 м. Смещение пучка в поперечном направлении осуществлялось с помощью электростатического толкателя системы подавления резистивной неустойчивости У-70. Сигналы с датчика выводились в зал электроники главного пульта У-70. Ускоренный до 63 ГэВ пучок в У-70 с 3 банчами интенсивностью $I_b = (0,5 - 0,6)10^{11}$ р/б, равномерно распределенными по орбите, перезахватывался на частоту 200 мГц. Необходимо отметить, что в перегруппированном пучке оставалась сильновыраженная структура 6 мГц, связанная с неполной разгруппировкой ускоренного пучка. Коэффициент захвата при этом составлял примерно 0,89 %. Через заданный промежуток времени таймер вырабатывал импульс, который служил сигналом для начала измерений. По этому сигналу внутренний генератор начинал стробировать модуль ADC, который преобразовывал сигнал в цифровую форму. Модуль ADC, разработанный для блока цифровой обработки сигнала СПРН, позволял плавно регулировать амплитуду входного сигнала на 40 дБ. Частота стробирующих импульсов составляла 10 мГц, что превышает частоту Найквиста и достаточно для воспроизведения сигнала с выхода блока головной электроники в цифровой форме. 8-битовые слова с выхода АЦП считывались в буфер DSP (*Digital Signal Processor*) через внутреннюю быструю шину, цикл которой равен 90 нсек. Число отсчетов варьировалось от 1024 до 4096. После заполнения буферной памяти ее содержимое перекачивалось в РС через последовательный порт для отображения на экране.

В результате проведенных испытаний подтвердилась функциональная работоспособность блоков головной электроники. Сначала было определено постоянное смещение орбиты относительно электрической оси датчика. При выключенном толкателе и отключенном блоке головной электроники напряжение на пластинах вертикального направления ΔZ составило 450 мВ. Амплитуда сигнала фиксировалась с помощью запоминающего осциллографа. Напряжение сигнала пересчитывалось в смещение ор-

биты, которое составило 7,5 мм. После этого к выходу датчика подключался блок головной электроники и проверялась работа Σ канала. Измеренная амплитуда суммарного сигнала на выходе блока составляла 0,5 В, что соответствует пиковому току банча 0,45 А. Достоверность измерений определялась путем сравнения измеренных величин с показаниями датчиков интенсивности. Коэффициент передачи тракта головной электроники был установлен равным 1. После этого пучок смещался толкателем. Относительные изменения амплитуды составили 6 мВ, что соответствует смещению пучка на 0,04 мм. Измерения были повторены для канала обработки сигнала радиального направления.

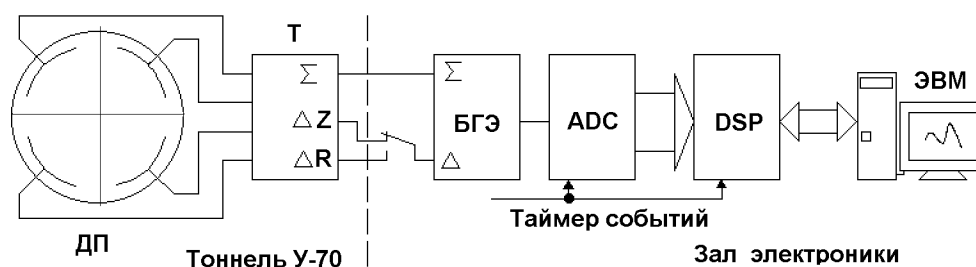


Рис. 2: Схема измерения прототипа головной электроники. БГЭ — блок головной электроники, ADC — аналого-цифровой преобразователь, DSP — цифровой сигнальный процессор, Т — $\pi/180$ гибрида, ДП — датчик положения пучка.

Список литературы

- [1] Балбеков В.И., Герцев К.Ф. Система подавления когерентной поперечной неустойчивости пучка в УНК: Препринт ИФВЭ 87-120. — Серпухов, 1987.
- [2] R.Bossart, J.P. Pappis, V. Rossi. // IEEE Transaction on Nuclear Science, Vol. NS-32, No. 5, October 1985.