

СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ БЕТАТРОННЫХ ЧАСТОТ БУСТЕРА КОМПЛЕКСА «СКИФ»

*О. В. Беликов, Е. А. Бехтенов, Е. Н. Дементьев, Г. В. Карпов*¹

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

Система измерения бетатронных частот, разработанная в Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера для бустера комплекса «СКИФ», обеспечивает быстрые и точные измерения дробной части бетатронных частот в течение всего цикла ускорения пучка в бустере. В этой системе реализован метод резонансной раскачки бетатронных колебаний с помощью радиочастотных импульсов, подаваемых на пластины кикера. Минимальное время одного измерения — 1,3 мс, при этом времени можно получить результаты измерения для каждой фазы цикла ускорения бустера. Система позволяет выполнять до 256 измерений за время подъема энергии пучка бустера 400 мс. Точность измерений бетатронных частот выше чем $0,001 f_0$, где f_0 — частота обращения бустера.

Tune measurement system developed at the Budker Institute of Nuclear Physics for the Booster of the “SKIF” project provides fast and accurate measurements of the fractional part of betatron tunes during the Booster acceleration cycle. Resonance excitation of betatron oscillations with help of radio frequency pulses feeding to the kicker electrodes is used in the system. The minimal tune measurement time is 1.3 ms, which allows having tunes measurement data for each phase of the Booster accelerating cycle. The system can perform up to 256 measurements during 400 ms time interval of Booster energy ramping. The tune measurement accuracy is better than $0.001 f_0$, where f_0 is the Booster revolution frequency.

PACS: 29.20.—с

ВВЕДЕНИЕ

Бустерный синхротрон для источника системы измерения 4-го поколения «Сибирский кольцевой источник фотонов» («СКИФ») разрабатывается и изготавливается сейчас в Институте ядерной физики (ИЯФ) им. Г. И. Будкера (Новосибирск) [1]. Основные параметры бустера приведены в таблице.

Требования к системе измерения бетатронных частот бустера следующие:

- время одного измерения — менее 3 мс;
- точность измерений — выше чем $10^{-3} f_0$.

Система измерения бетатронных частот, удовлетворяющая этим требованиям, разработанная и изготовленная в ИЯФ им. Г. И. Будкера, включает в себя полосковый кикер, усилитель мощности, полосковый датчик положения пучка (пикап) и электронику обработки сигналов (рис. 1).

В системе реализован метод резонансной раскачки бетатронных колебаний синусоидальным напряжением, подаваемым на электроды кикера. Бетатронные колебания

¹E-mail: karpov_gen@mail.ru

Основные параметры бустера

Параметр	Значение
Энергия пучка инжекция/выпуск	200 МэВ/3 ГэВ
Частота работы, Гц	1
Частота обращения f_0 , МГц	1,888
Частота ВЧ, МГц	356,98
Бетатронные частоты ν_x/ν_y	9,6455/3,4105
Заряд пучка, нКл	0,5–15
Время подъема энергии, мс	400

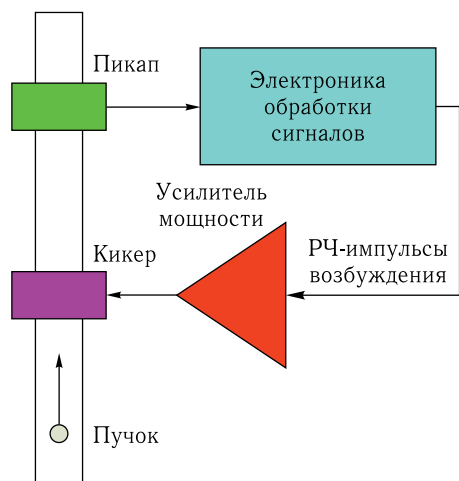


Рис. 1. Структура системы измерения бетатронных частот бустера

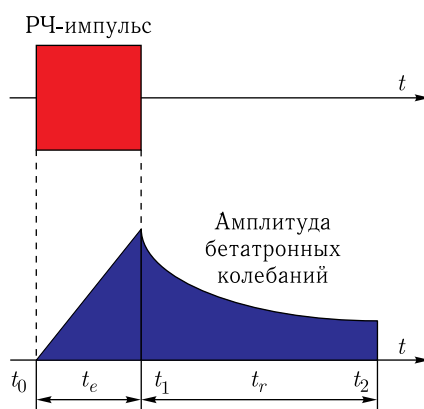


Рис. 2. Возбуждение бетатронных колебаний

пучка возбуждаются радиочастотными (РЧ) импульсами с частотой заполнения f_e , близкой к частоте $f_B = (2 + \nu_{x,y})f_0$, где f_0 — частота обращения бустера, $\nu_{x,y}$ — дробная часть горизонтальной (вертикальной) бетатронной частоты (рис. 2). Длительность РЧ-импульсов t_e — 100–200 мкс.

Измерения возможны при условии, если разница между частотой возбуждения f_e и частотой $(2 + \nu_{x,y})f_0$ не превышает $(0,01–0,02)f_0$. В этом случае сигнал бетатронных колебаний появляется на электродах полоскового пикапа по окончании РЧ-импульса возбуждения. Этот сигнал поступает в электронику обработки сигналов, где он преобразуется в цифровой вид с помощью АЦП и обрабатывается в ПЛИС (FPGA). Результатом обработки сигнала являются измеренные значения дробных частей бетатронных частот $\nu_{x,y}$.

ОПИСАНИЕ СИСТЕМЫ

Функциональная схема системы измерения бетатронных частот представлена на рис. 3. Эта система состоит из полоскового пикапа, полоскового кикера, электроники обработки сигналов и электроники для раскачки бетатронных колебаний

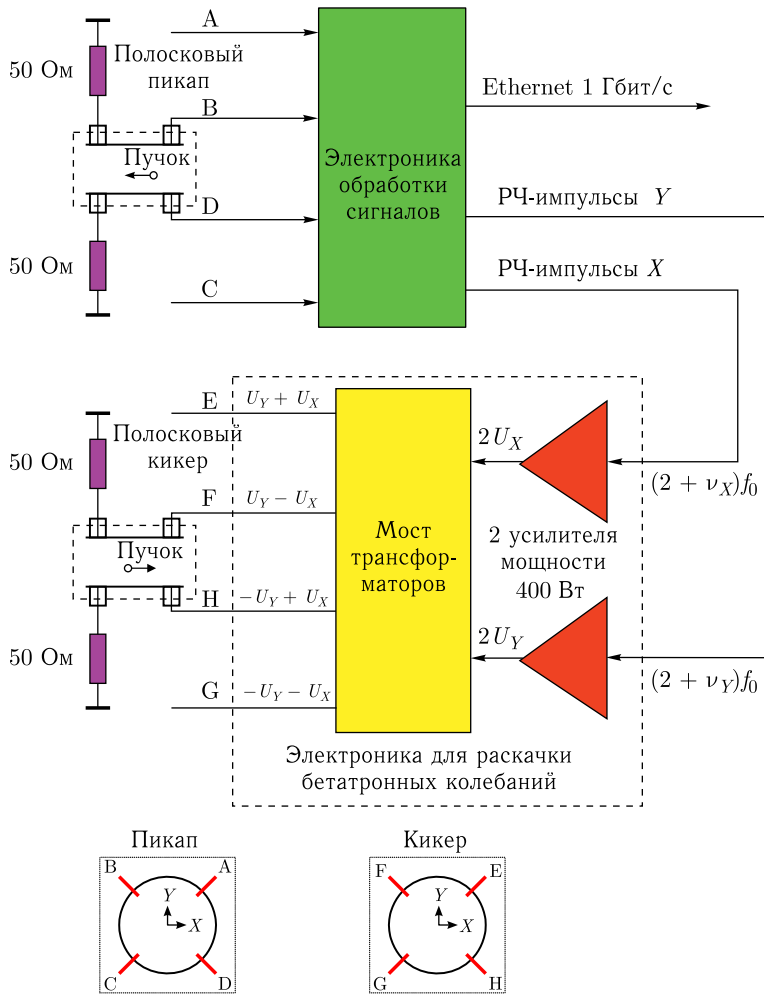


Рис. 3. Функциональная схема системы измерения бетатронных частот



Рис. 4. Кикер (вверху) и пикап (внизу)

пучка. Полосковые электроды пикапа и кикера расположены под углом 45° к горизонтальной плоскости. Оба конца каждого электрода соединены с 50 Ом /450 °С вакуумными вводами с разъемами типа SMA (рис.4). Длина полосковых электро-



Рис. 5. Электроника системы измерения бетатронных частот

дов — 450 мм у кикера и 210 мм у пикапа. Длина полоскового электрода пикапа примерно равна $\lambda/4$ (λ — длина волны) на частоте ВЧ бустера 356,98 МГц.

Сигналы с пикапа поступают в электронику обработки сигналов, где вычисляются дробные части бетатронных частот. Электроника обработки сигналов включает в себя синтезатор частот прямого синтеза (DDS), куда записываются коды частот возбуждения f_e . Электроника возбуждения бетатронных колебаний пучка состоит из двух усилителей мощности с номинальной мощностью 400 Вт, моста трансформаторов и четырех 50-омных нагрузок. РЧ-импульсы из электроники обработки сигналов поступают на вход одного из усилителей мощности. С выхода усилителя мощности РЧ-импульсы амплитудой ~ 200 В распределяются между четырьмя пластинами кикера с помощью трансформаторного моста. Такая схема обеспечивает селективное возбуждение либо горизонтальных, либо вертикальных колебаний пучка в зависимости от подачи РЧ-импульсов либо на один, либо на другой усилитель мощности.

Электроника системы измерения бетатронных частот показана на рис. 5. Самый верхний модуль — блок электроники обработки сигналов. Затем (сверху вниз) идут двухканальный усилитель мощности, источник питания усилителя мощности и крейт с блоком трансформаторов и четырьмя нагрузками.

БЛОК ЭЛЕКТРОНИКИ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

Функциональная схема блока электроники обработки сигналов приведена на рис. 6.

Блок электроники обработки сигналов содержит четыре одинаковых канала аналоговой обработки сигналов (А, В, С, D). Для измерений используется первая гармоника частоты ВЧ $189f_0$ (356,98 МГц), которая выделяется из спектра сигнала с помощью полосовых ПАВ-фильтров с полосой ~ 6 МГц. Каждый канал аналоговой обработки сигналов обеспечивает программную регулировку усиления в диапазоне 0–30 дБ с шагом 1 дБ, что обеспечивает оптимальную работу блока в широком диапазоне тока пучка.

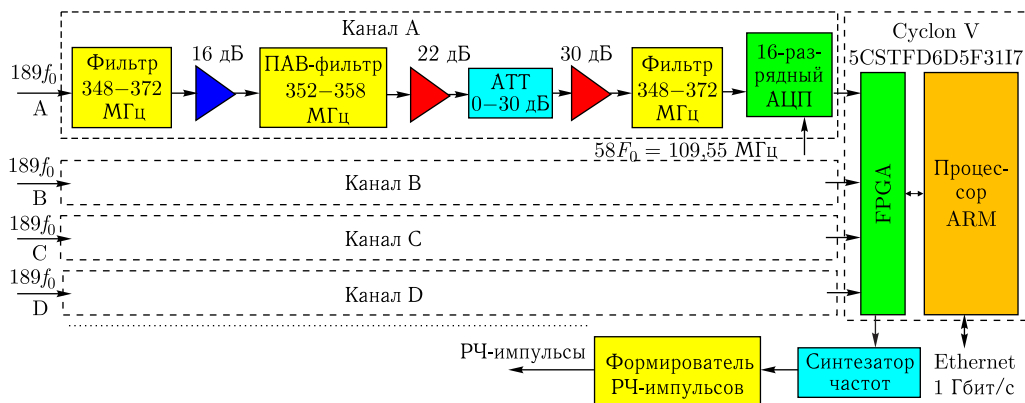


Рис. 6. Функциональная схема блока электроники обработки сигналов

Сигналы преобразуются в цифровой вид с помощью 16-разрядного АЦП с частотой выборки $f_{\text{АЦП}} = 58f_0 \approx 109,55$ МГц. Частота выборки АЦП генерируется малошумящим PLL-генератором с фазовым шумом не более 0,5 пс в полосе ~ 2 МГц. Оцифрованные сигналы поступают в ПЛИС (FPGA) Cyclon V 5CSTFD6D5F3117, где выполняется их окончательная обработка. Из-за свертки частот частота сигнала на входе ПЛИС будет равна $15f_0$. Цифровая обработка сигнала внутри ПЛИС включает в себя:

- 1) синхронное детектирование;
- 2) фильтрацию;
- 3) вычисление массива пооборотных измерений на основе данных АЦП;
- 4) вычитание сигнала смещения орбиты пучка в массиве пооборотных измерений;
- 5) умножение массива на окно Хеннинга;
- 6) 1024-точечное быстрое преобразование Фурье;
- 7) вычисление центра тяжести спектра сигнала.

Найденный центр тяжести спектра сигнала соответствует искомой дробной части бетатронной частоты $\nu_{x,y}$. Время вычисления одного значения $\nu_{x,y}$ составляет $\sim 0,8$ мс.

Чип 5CSTFD6D5F3117 помимо ПЛИС содержит ARM-процессор, в котором работает операционная система Linux. В данном процессоре работает Eric's IOC, которая управляет блоком на нижнем уровне и обеспечивает связь через Ethernet-интерфейс 1 Гбит/с с системой управления комплекса «СКИФ».

Помимо измерений бетатронных частот блок электроники обработки сигналов может выполнять обычные измерения положения пучка в месте расположения плоскового пикапа. Блок размещен в корпусе 1U евромеханики шириной 19 дюймов (см. рис. 5 сверху).

ОПИСАНИЕ ЦИКЛА ИЗМЕРЕНИЯ

Временная диаграмма полного цикла измерения представлена на рис. 7. Полный цикл измерения бетатронных частот стартует с впуском пучка в бустер и состоит из N элементарных циклов.

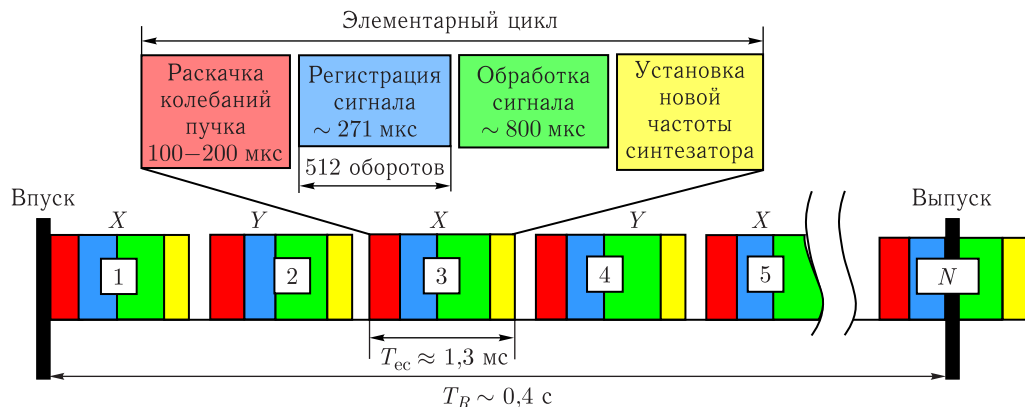


Рис. 7. Временная диаграмма цикла измерения

Каждый элементарный цикл включает в себя четыре стадии:

- раскачку бетатронных колебаний;
- регистрацию сигнала;
- обработку сигнала и нахождение $\nu_{x,y}$;
- установку новой частоты синтезатора (DDS).

Длительность одного элементарного цикла T_{ec} — не более 1,3 мс. Измерения ν_x и ν_y чередуются от одного элементарного цикла к другому. В элементарные циклы с нечетными номерами (1, 3, 5, ...) измеряется дробная часть горизонтальной бетатронной частоты ν_x . В элементарные циклы с четными номерами (2, 4, 6, ...) измеряется дробная часть вертикальной бетатронной частоты ν_y .

Измерения бетатронных частот возможны, когда разница между частотой синтезатора и частотой $(2 + \nu_{x,y})f_0$ не превышает $(0,01-0,02)f_0$. В этом случае сигнал бетатронных колебаний появляется по окончании РЧ-импульса. Для обеспечения этого условия в блоке электроники обработки сигналов осуществляется слежение частоты синтезатора за измеренной бетатронной частотой. Перед началом нечетного элементарного цикла m устанавливается частота синтезатора F_m , равная $(2 + \nu_x)f_0$, где ν_x — дробная часть горизонтальной бетатронной частоты, измеренная в течение элементарного цикла $m-2$. Перед началом четного элементарного цикла n устанавливается частота синтезатора F_n , равная $(2 + \nu_y)f_0$, где ν_y — дробная часть вертикальной бетатронной частоты, измеренная в течение элементарного цикла $n-2$. Важно установить правильные частоты синтезатора для первых двух элементарных циклов с номерами 1, 2. Для этого используются остаточные колебания пучка, возникающие сразу же после инъекции пучка в бустер. Спектр этих колебаний содержит как горизонтальную, так и вертикальную бетатронную частоту.

РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТОВЫХ ИСПЫТАНИЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Разработанная и изготовленная в ИЯФ электроника системы измерения бетатронных частот была протестирована на испытательном стенде. Схема теста электроники обработки сигналов показана на рис. 8.

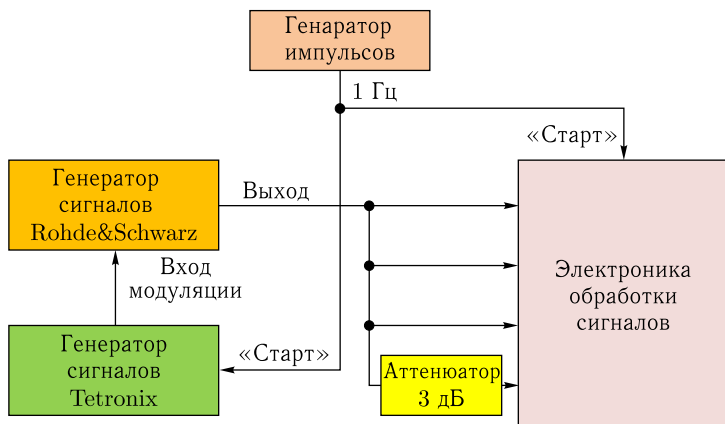
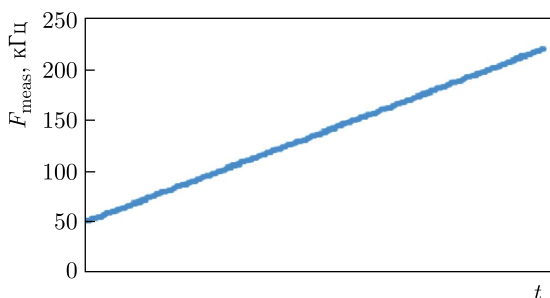


Рис. 8. Схема теста электроники обработки сигналов

Рис. 9. Результаты измерений F_{meas} в течение периода изменения частоты модуляции F_{mod} в диапазоне 50–220 кГц

В тесте использованы два генератора синусоидальных сигналов и один генератор импульсов. Один из генераторов (Rohde&Schwarz SMB 100A) вырабатывает синусоидальный сигнал частотой ВЧ $\sim 356,98$ МГц с амплитудной модуляцией. Второй генератор (Tetronix AFG3102) вырабатывает сигнал амплитудной модуляции с частотой F_{mod} , которая поступает на вход модуляции первого генератора. Эта частота меняется линейно в диапазоне 50–220 кГц ($0,026\text{--}0,116$) f_0 в течение времени $\Delta t = 400$ мс с момента прихода импульса «Start» из генератора импульсов. Этот же импульс приходит на вход электроники обработки сигналов, запуская цикл измерения. Электроника обработки сигналов измеряет частоту амплитудной модуляции сигнала F_{meas} . Результаты измерений представлены на рис. 9.

Разность частот F_{mod} и F_{meas} дает погрешность измерений. Данный тест дает погрешность измерения бетатронной частоты менее $10^{-3} f_0$.

ИЗМЕРЕНИЯ БЕТАТРОННЫХ ЧАСТОТ СИСТЕМОЙ ПИКАПОВ БУСТЕРА

Система пикапов бустера состоит из 37 пикапов и электроники. Пикапная электроника, разработанная в ИЯФ им. Г. И. Будкера, позволяет выполнять пооборотные измерения положения пучка в течение всего цикла подъема энергии в бустере. После

каждого цикла работы бустера в памяти блоков электроники пикапов будет информация о положении пучка за каждый оборот в промежутке времени между впуском и выпуском пучка. Элементарные циклы измерения бетатронных частот привязаны по времени к частоте синхронизации 10 кГц. Внутри каждого блока электроники пикапов также имеется эта частота, а следовательно, и информация о времени положения элементарных циклов. Прочитав определенные массивы из памяти пооборотных измерений, после их обработки получим массив бетатронных частот для всего промежутка времени (от впуска до выпуска пучка) для каждого из 37 блоков электроники пикапов. Это дает возможность измерять не только бетатронные частоты, но и бета-функцию бустера.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная и изготовленная в ИЯФ им. Г. И. Будкера система измерения бетатронных частот удовлетворяет всем требованиям бустера комплекса «СКИФ». Она позволяет измерять с точностью выше $10^{-3}f_0$ дробные части бетатронных частот в каждой фазе цикла подъема энергии пучка, что особенно важно при запуске бустера. В настоящее время все компоненты системы изготовлены и протестированы. В 2024 г. планируется запуск системы в эксплуатацию на бустере.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bukhtiyarov A. V. et al.* Synchrotron Radiation Facility “Siberian Circular Photon Source” (SRF SKIF) // *Crystallogr. Rep.* 2022. V. 67, Iss. 5. P. 690–711.

Получено 18 ноября 2022 г.