

СИСТЕМА МОНИТОРИНГА СИНХРОТРОННЫХ КОЛЕБАНИЙ

А. А. Троицкий^{а, 1}, А. А. Володин^{а, 2}, Ф. Н. Ганюшкин^а

^а Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

Разбирается одна из причин роста продольного эмиттansa в бустере, возникшего в четвертом пусконаладочном сеансе, а затем предлагается эффективный способ диагностики. Рассматриваются особенности метода, аппаратное решение и программное обеспечение.

The paper discusses one of the reasons for the increase of longitudinal emittance in Booster, which appeared in the fourth commissioning session, and then proposes an effective diagnostic method. It describes the features of the proposed method, as well as the hardware and software solutions used.

PACS: 29.20.dk

ВВЕДЕНИЕ

В составе ускорительного комплекса NICA (Nuclotron based Ion Collider fAcility) работают сверхпроводящие синхротроны бустер и нуклотрон. Коллайдерные эксперименты на встречных пучках требуют высокой интенсивности ионов для достижения высокой светимости. Для этого необходимо повысить эффективность захвата и ускорения цепочки бустер–нуклотрон. Данные последнего сеанса 2023 г. приведены на рис. 1.

Проектные параметры коллайдера требуют интенсивности инжектированного пучка на уровне 10^9 [2]. На основании данных на рис. 1 можно сделать вывод, что необходимо повысить выходную интенсивность нуклотрона примерно на 2 порядка. Одна из таких мер — недопущение роста продольного эмиттansa при ускорении. Для этого была разработана система мониторинга синхротронных колебаний, которая позволит повысить эффективность анализа процессов, влияющих на захват пучка и ускорение, а следовательно, увеличить скорость нахождения неточностей, связанных с настройкой параметров ВЧ-напряжения.

¹E-mail: andrey69612@jinr.ru

²E-mail: volodin@jinr.ru

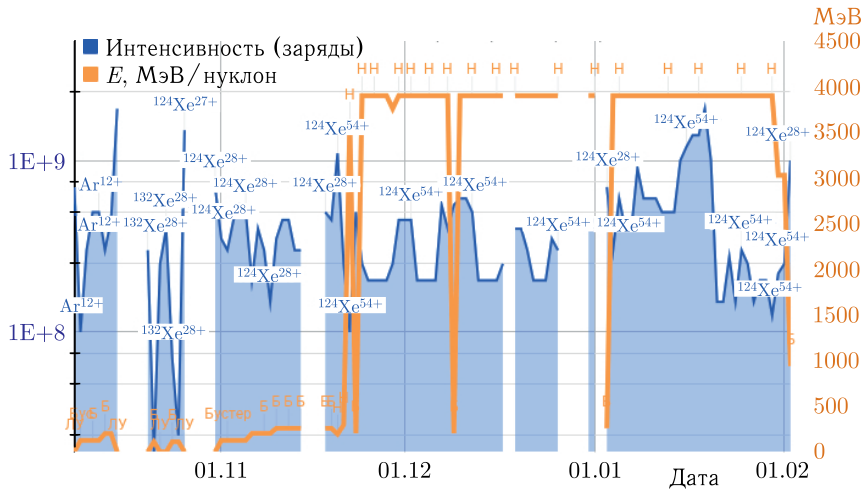


Рис. 1. Интенсивность пучка в кольцах нуклотрона и энергия по данным последнего сеанса 2023 г. [1]

1. ИССЛЕДОВАНИЕ СИГНАЛА

В четвертом пусконаладочном сеансе на комплексе NICA был замечен процесс роста продольного эмиттанта из-за неточных коэффициентов связи ускоряющей частоты с магнитным полем, что приводило к резкому изменению фазы напряжения высокой частоты (ВЧ). Происходило возбуждение синхротронных колебаний на столе вывода бустера, оказывающих негативное влияние на интенсивность ионного пучка при захвате в нуклотроне.



Рис. 2. Сигналы электроники ДПП ВЧ-станций. Цена деления по оси времени — 200 мс, по вертикали — 1 В

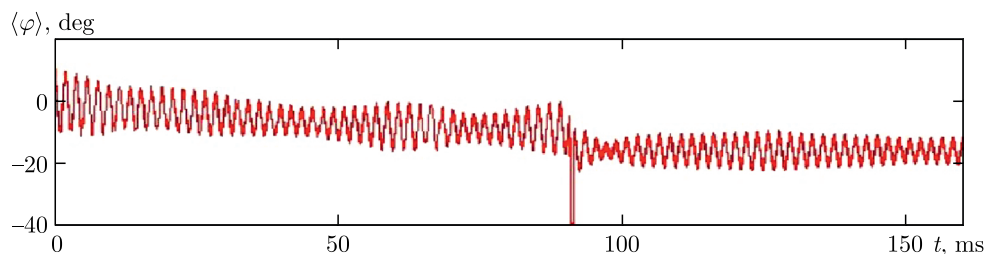


Рис. 3. Зависимость синхротронной частоты от времени (бустер)

На рис. 2 показаны зависимости от времени ускоряющего напряжения, производной магнитного поля и показаний датчика поперечного положения пучка (BPS, ДПП [3]). Анализ процессов, приводящих к неэффективному захвату пучка в нуклотроне, содержал задачу оценки синхротронной частоты. Измерение синхротронной частоты проводилось с помощью быстрого трансформатора тока. Оцифровка запускалась в конце цикла ускорения в бустере. Длительность сбора данных составляла 210 мс, частота дискретизации — 50 МГц (рис. 3). При измерении было обнаружено резкое изменение фазы пучка, которое впоследствии подтвердилось на датчике положения пучка.

На сигнале с ДПП в конце цикла ускорения виден «скол», свидетельствующий о резком изменении орбиты (см. рис. 2). Причиной скола являлись неточные коэффициенты связи частоты с магнитным полем. Следует отметить, что нулевое значение сигнала поперечного положения пучка не было откалибровано.

Выявление причины возникновения колебаний потребовало времени и дополнительных экспериментов, поэтому было принято решение разработать систему мониторинга синхротронных колебаний. Также для предотвращения роста продольного эмиттанта разрабатывается обратная связь по положению пучка, основной функцией которой будет компенсация как медленных процессов, связанных с уходом параметров на длинном промежутке времени, так и быстрых процессов, связанных с мгновенными изменениями.

2. ФАЗОВЫЙ МОНИТОР. СИСТЕМА МОНИТОРИНГА СИНХРОТРОННЫХ КОЛЕБАНИЙ

Система мониторинга позволит повысить эффективность анализа процессов, влияющих на захват пучка и ускорения, следовательно, уменьшится время поиска неточностей, связанных с настройкой параметров ВЧ-напряжения.

Фазовый монитор — это устройство, которое способно определять частоту и амплитуду малых синхротронных колебаний ионного пучка в процессе ускорения (рис. 4). Сперва рассмотрим техническую сторону устройства, а далее — полученные результаты стендовых испытаний.

Фазовый монитор использует три входных сигнала для определения частоты и амплитуды синхротронных колебаний:

- 1) опорный ВЧ-сигнал ускоряющей частоты — $S \sin(\omega_{ac1}t)$;
- 2) опорный ВЧ-сигнал ускоряющей частоты, сдвинутый на 90° , — $C \cos(\omega_{ac1}t)$;
- 3) сигнал пучка с пикап-электрода — $B \sin(\omega_{ac1}t + \varphi) = B \sin(\omega_{beam}t)$.

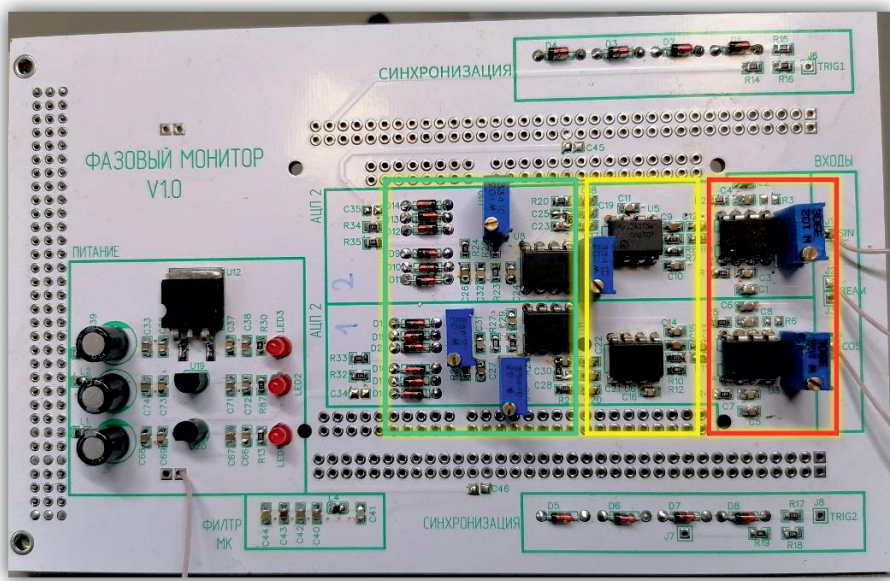


Рис. 4. Фазовый монитор: вид спереди

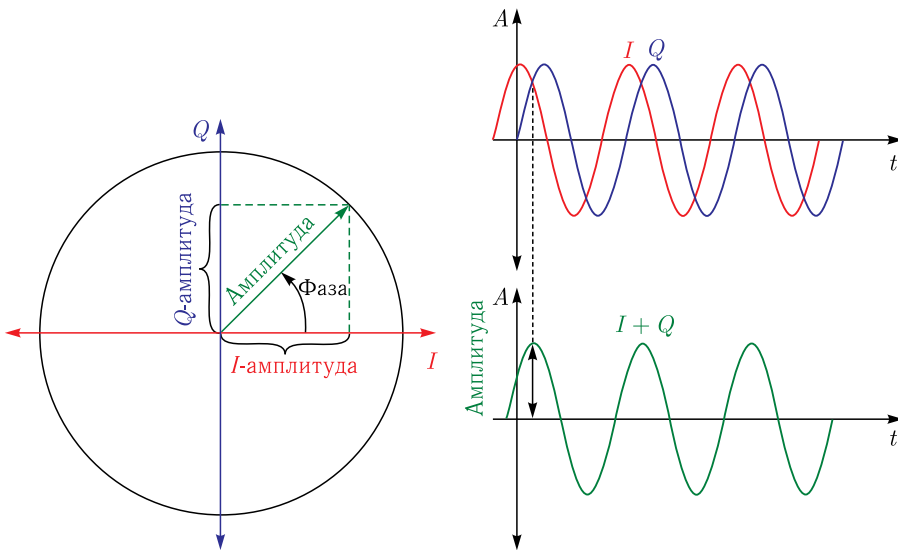


Рис. 5. Фазовая диаграмма IQ-метода

Основа работы устройства — это квадратурная IQ-демодуляция (In-phase-Quadrature) (рис. 5). Метод заключается в ортогонализации входных сигналов с последующим выделением необходимой частотной составляющей с помощью фильтров.

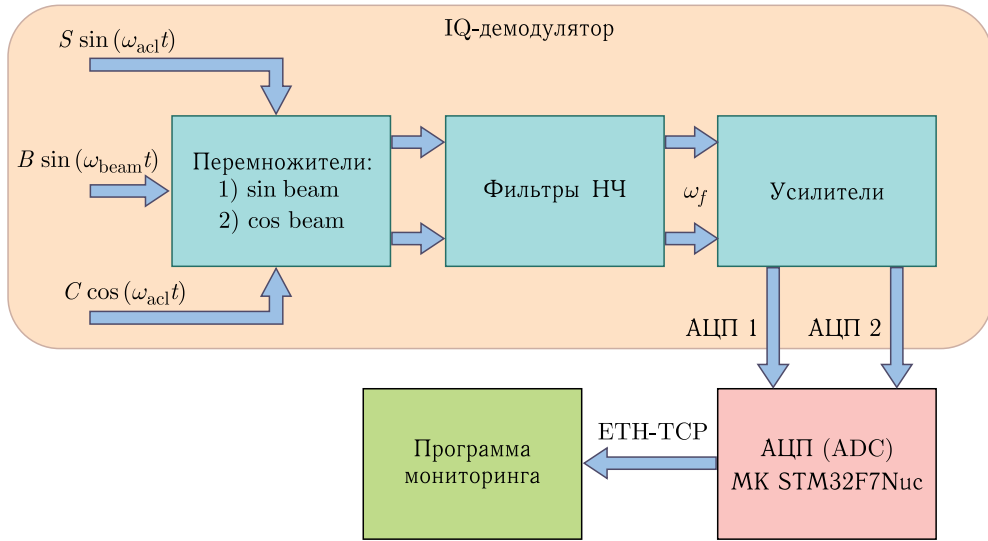


Рис. 6. Блок-схема фазового монитора

Блок-схема фазового монитора представлена на рис. 6. Отдельно выделен модуль квадратурного IQ-демодулятора с перемножителями, фильтрами и усилителями выходных сигналов [4].

Сигнал пучка перемножается с обоими сигналами ВЧ-напряжения. И, как мы понимаем, в результирующих сигналах будет находиться как ускоряющая частота, так и частота синхротронных колебаний, содержащаяся в ω_{beam} :

$$\begin{cases} \frac{1}{2}BS \{ \cos(\omega_{\text{beam}}t - \omega_{\text{acl}}t) - \cos(\omega_{\text{beam}}t + \omega_{\text{acl}}t) + \dots \}, \\ \frac{1}{2}BC \{ \sin(\omega_{\text{beam}}t - \omega_{\text{acl}}t) + \sin(\omega_{\text{beam}}t + \omega_{\text{acl}}t) + \dots \}, \end{cases}$$

где B , S , C — амплитуды сигналов пучка и опорных ВЧ-сигналов \sin , \cos соответственно. Под $\omega_{\text{beam}}t$ понимаем $\omega t + \varphi$, где φ — фаза пучка относительно фазы опорного ВЧ-сигнала ускоряющей частоты.

Полученные сигналы содержат высокочастотные и низкочастотные компоненты. Для выделения низкочастотных составляющих, которые описывают синхротронные колебания, применяются фильтры нижних частот. Фильтры спроектированы из расчета частоты среза $\omega_{\text{cut}} = 20$ кГц при максимальной частоте синхротронных колебаний в бустере и нуклотроне не более 1,5 кГц. Таким образом, оставлен запас по полосе пропускания частот.

Результат работы фильтров низкой частоты (НЧ) представлен ниже. Как можно видеть, получены две ортогональные составляющие, которые содержат частоту синхротронных колебаний $\omega_f = \omega_{\text{beam}} - \omega_{\text{acl}}$, где $\omega_f t = \varphi$:

$$\begin{cases} V_Q = \frac{1}{2}BS \cos(\omega_{\text{beam}}t - \omega_{\text{acl}}t), \\ V_I = \frac{1}{2}BS \sin(\omega_{\text{beam}}t - \omega_{\text{acl}}t). \end{cases}$$

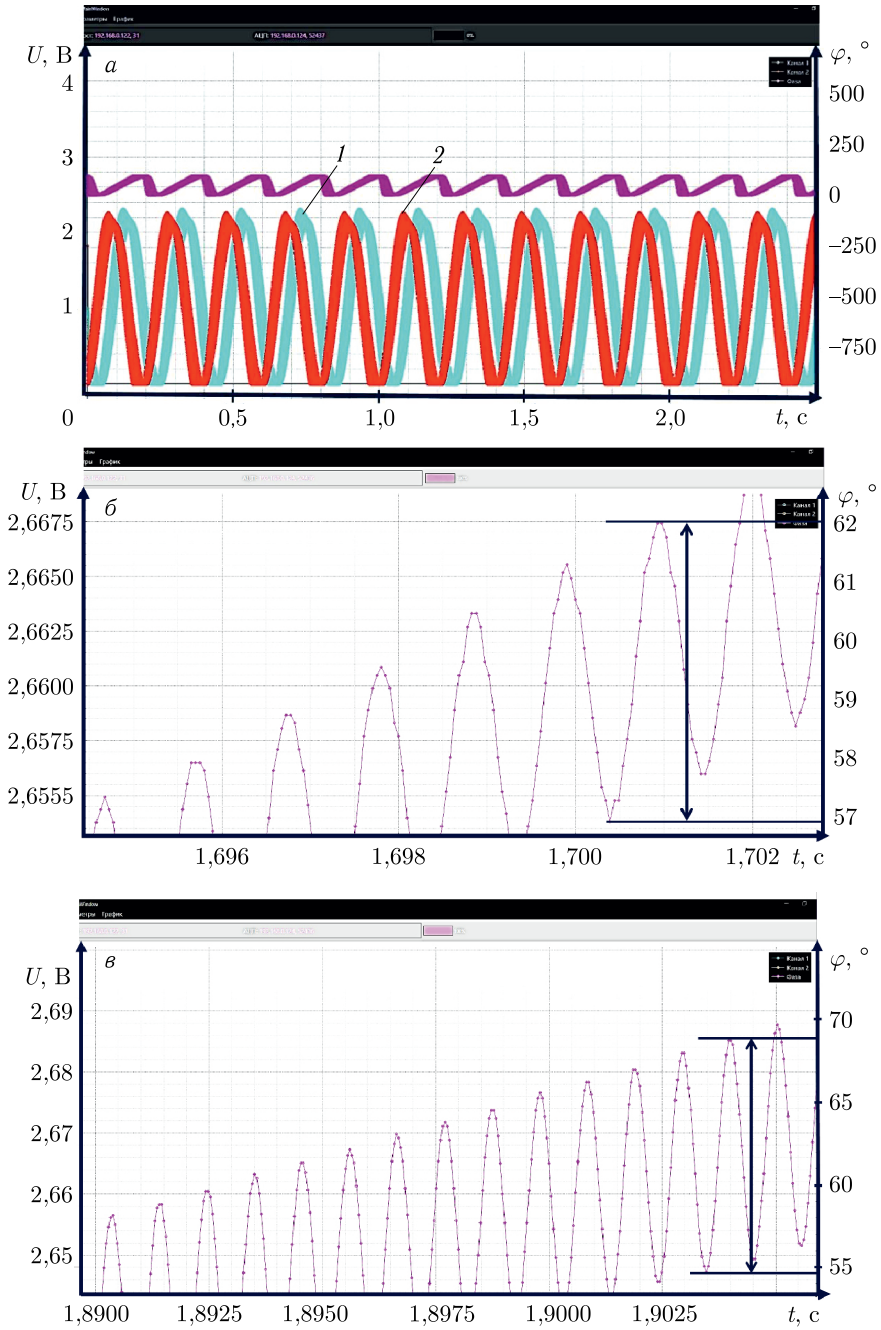


Рис. 7 (цветной в электронной версии). Программа мониторинга: *a*) общий вид; *б, в*) данные синхронных колебаний

Значение фазы синхротронных колебаний находят с помощью квадратурных составляющих V_I и V_Q соответственно, взятых из системы выше. Угол вычисляется по формуле

$$\theta = a \tan \left(\frac{V_Q}{V_I} \right).$$

Результатом являются оцифрованные данные, которые представлены графиками в специальной программе мониторинга. Графики несут в себе информацию о частоте и амплитуде синхротронных колебаний. Проведенные стендовые испытания позволили оценить реальные характеристики прибора. Точность измерения амплитуды фазы $1,5^\circ$. Частота дискретизации двух параллельных 10-битных АЦП выбрана 20 кГц.

Окно программы мониторинга показано на рис. 7, а. Тесты устройства проводились с использованием задающего генератора Teledyne LeCroy WaveStation 3162. На рис. 7, б приведены результаты измерения, где синхротронные колебания имели частоту 1 кГц и амплитуду отклонения 5° , на рис. 7, в — частоту 1 кГц и амплитуду 15° .

Возрастающий тренд связан с точностью используемого оборудования, в том числе задающего генератора, а также с работой активного фильтра Баттерворта (конкретно схема Рауха), примененного в фазовом мониторе. Фильтр нижних частот демпфирует частоты свыше 20 кГц, а нижние частоты пропускает. Разность частот в выходных сигналах генератора Teledyne LeCroy WaveStation 3162 составляет порядка 1 Гц при несущей частоте 1 МГц. Расхождение каналов можно увидеть на рис. 7, а, синий (1) и красный (2) лучи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен анализ процесса, приводящего к возникновению синхротронных колебаний на столе вывода бустера. По его итогам разработана система мониторинга синхротронных колебаний. Проведены стендовые испытания системы мониторинга.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сайт ускорительного отделения <http://nucloweb.jinr.ru/nucloserv/online.htm>.
2. Бровко О. И., Володин А. А., Лебедев В. А., Сыресин Е. М., Сидорин А. О., Фаткин Г. А. Работа ВЧ-систем в ходе совместных сеансов бустера и нуклотрона // Сиб. физ. журн. 2024. Т. 19, № 2. С. 41–49.
3. Володин А. А. Разработка аппаратных решений и программного обеспечения по улучшению захвата ВЧ-системами бустера и нуклотрона. Стендовый доклад. Программно-консультативный комитет по физике частиц. Дубна, 2024.
4. Троицкий А. А. IQ-демодулятор фазового монитора пучка частиц. Дис. ... маг. Гос. ун-т «Дубна». Дубна, 2024. 45 с.

Получено 28 октября 2024 г.