

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ДИАГНОСТИКИ ПУЧКА НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА СИГНАЛА ПИКАП-ЭЛЕКТРОДА: РЕЗУЛЬТАТЫ СТЕНДОВЫХ ИСПЫТАНИЙ

*Л. А. Павлов^{a,1}, И. В. Калагин^a, С. В. Митрофанов^a,
В. А. Семин^a, В. И. Лисов^a*

^a Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, 141980, Россия

Одним из важных направлений ускорительной техники является развитие методов диагностики пучков заряженных частиц. В работе представлена система, разработанная в Лаборатории ядерных реакций Объединенного института ядерных исследований, которая помогает осуществлять онлайн-мониторинг характеристик пучка в ускорительной камере циклотрона.

The development of diagnostic methods for charged particle beams is one of the important directions in accelerator technology. This paper presents a system developed at the Laboratory of Nuclear Reactions of the Joint Institute for Nuclear Research, which facilitates online monitoring of beam characteristics in the accelerating chamber of a cyclotron.

PACS: 29.27.Fh; 29.20.dg

ВВЕДЕНИЕ

Одним из важных направлений в ускорительной технике является развитие методов диагностики пучков заряженных частиц. Неразрушающие методы диагностики пучков (минимально влияющих на характеристики пучка) наиболее актуальны, так как позволяют проводить измерения без воздействия на пучок и организовывать непрерывный контроль параметров пучка заряженных частиц и процесса ускорения. Это особенно важно для изучения непрерывных процессов, происходящих в облучаемых пучком мишенях, результаты которых могут быть искажены при использовании традиционных (нарушающих структуру пучка) методов диагностики, а также для длительных экспериментов, в течение которых необходим непрерывный контроль для сохранения параметров облучения.

Пикап-электроды — это устройства, которые используются для неразрушающей диагностики пучков заряженных частиц. Они представляют собой тонкие металлические пластины, расположенные вдоль оси движения пучка. Когда пучок частиц

¹E-mail: pavlova@jinr.ru

проходит возле пикап-электрода, он создает электрический сигнал, который пропорционален току пучка. Этот сигнал может быть обработан и проанализирован с помощью специальной аппаратуры и программного обеспечения.

Разработанная система позволяет осуществлять онлайн-мониторинг характеристик пучка в ускорительной камере циклотрона, таких как фаза ускорения, координаты орбит относительно медианной плоскости и другие параметры. Полученные данные в реальном времени позволяют проводить точную настройку корректирующих катушек и основного магнитного поля, что повышает эффективность и стабильность работы ускорителя.

Перед тестированием системы на ускорителе частиц требуется провести стендовые испытания ее отдельных компонентов для выявления проблем и недостатков конструкции. Данная работа необходима для исследования зависимости сигнала с пикап-электрода от параметров пучка заряженных частиц, чтобы впоследствии можно было восстановить параметры пучка при работе на ускорителе по параметрам измеренного сигнала [1].

ИСПЫТАНИЯ

Для юстировки и испытания системы внутренних пикап-электродов был собран стенд, имитирующий с помощью емкостной связи прохождение пучка частиц в апертуре чувствительного элемента датчика. Стенд представляет собой проводник — формирующую линию, куда подавался импульсный сигнал от генератора. Импульс тока в проводнике имитирует движение сгустка заряженных частиц. Чувствительным элементом является прямоугольная металлическая пластина (пикап-электрод), которую предполагается устанавливать в ускоритель заряженных частиц. К пластине подключается осциллограф для измерения сигналов, наведенных на пластине импульсами тока, проходящими по формирующей линии. Компоновка стенда предполагает возможность изменять расстояние между пикап-электродом и формирующей линией, а также амплитуду, частоту и другие параметры импульсов в формирующей линии, имитирующих пролет сгустка ионов.

В процессе испытаний на формирующую линию стенда подавались сигналы разной формы, имитирующие сгустки частиц в ускорительной камере циклотрона. Проводились исследования отклика пикап-электродов и влияния фильтров второй гармоники на сигнал.

Для имитации временной структуры сгустка (банча) ускоряемого пучка циклотрона ДЦ-280 использовалось гауссово распределение с длительностью импульса 6 нс по полувысоте (гауссов пучок). Осциллограмма импульса и сигнал, наведенный на пикап-электрод, представлены на рис. 1. Наведенный (отклик пикапа) сигнал представляет собой продифференцированный первичный (задающий) сигнал, амплитуда которого соответствует (1), где Q — заряд в пучке, R — сопротивление нагрузки.

$$U(t) = RI(t) = \frac{RdQ(t)}{dt}. \quad (1)$$

Для дальнейшей обработки и уменьшения влияния на измеряемый сигнал наводок от ускоряющей системы с помощью полосовых фильтров выделяем из сигнала с пикап-электродов вторую гармонику. Осциллограмма импульса в формирующей линии и выделенной второй гармонике представлена на рис. 2. Важно заметить, что

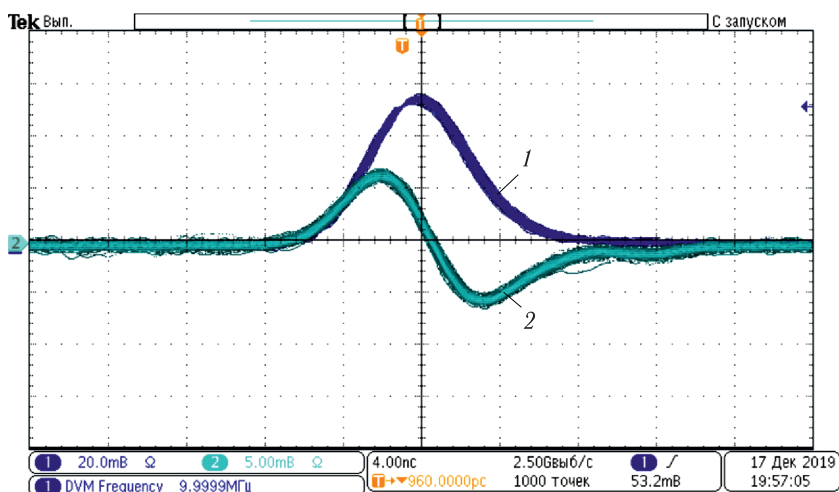


Рис. 1 (цветной в электронной версии). Отклик пикап-электрода при имитации гауссова пучка. Синий цвет (1) — импульс в формирующей линии; бирюзовый цвет (2) — отклик пикап-электрода

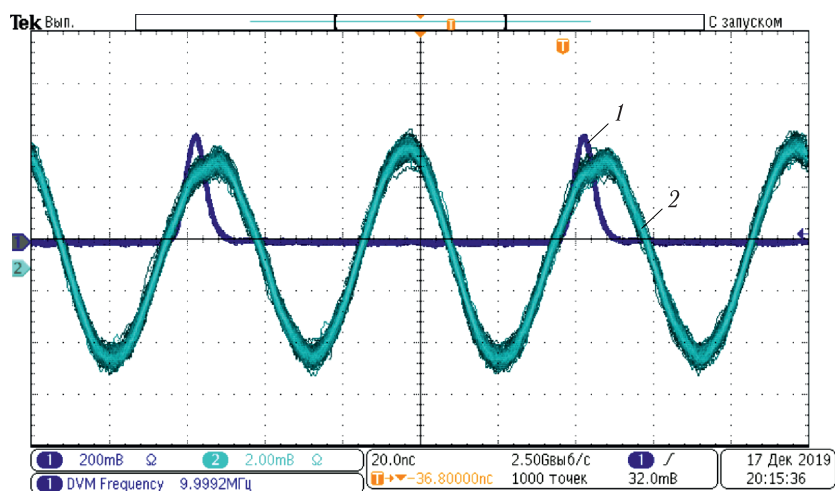


Рис. 2 (цветной в электронной версии). Вторая гармоника сигнала с пикапов при имитации гауссова пучка. Синий цвет (1) — импульс в формирующей линии; бирюзовый цвет (2) — отклик пикап-электрода, вторая гармоника

фаза второй гармоники сигнала на рис. 2 смещена относительно несущей частоты на некоторую величину из-за фазового отклика фильтрующих цепей. Компенсация такого эффекта должна производиться индивидуально для каждого ускорителя, например, с помощью использования синхронных усилителей.

Для определения зависимости амплитуды второй гармоники сигнала от длительности банча проводились измерения с разной длительностью имитирующего сигнала

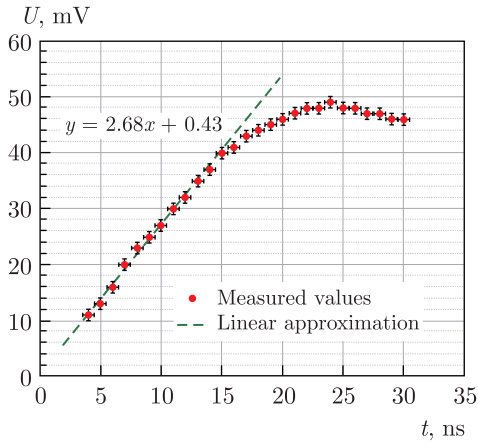


Рис. 3. Зависимость амплитуды второй гармоники сигнала U от длительности импульса задающего сигнала t , имитирующего пролет сгустка частиц

в форме Гаусса в диапазоне от 3 до 30 нс. Данные представлены на рис. 3. На начальном участке зависимость амплитуды второй гармоники от длительности банча близка к линейной. Так как для большинства циклотронов длина банча варьируется в интервале от 3 до 12 нс, можно сделать вывод о достаточной точности линейной аппроксимации во всех режимах работы циклотрона, что упрощает методики пересчета и интерпретации измеряемых сигналов при длине банча до 15 нс (см. рис. 3).

Также исследовалась амплитуда второй гармоники сигнала с пикап-электрода линейно от амплитуды сигнала формирующей линии, которая имитирует ток пучка. Результаты испытания представлены на рис. 4. Амплитуда второй гармоники пропорциональна амплитуде импульса в формирующей линии.

Одна из задач, которую можно решить с помощью пикап-электрода, — определение расстояния от центра масс пучка до чувствительного элемента датчика. Это позволит определять координату центра масс пучка в апертуре ускорителя или ионопровода. В ходе испытаний была оценена зависимость амплитуды сигнала второй гармоники с пикап-электрода от расстояния до формирующей линии, имитирующей пролет пучка. Результаты представлены на рис. 5.

Также было проведено исследование сигнала с пикап-электродов, моделирующее ситуацию, когда в область их действия попадают пучки с двух соседних орбит, име-

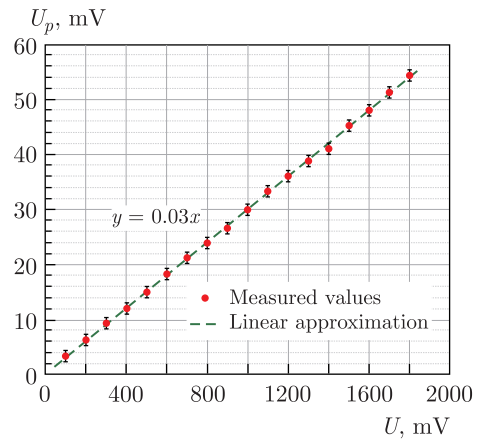


Рис. 4. Зависимость амплитуды второй гармоники сигнала с пикап-электрода U_p от амплитуды сигнала задающей линии U , имитирующей пролет сгустка частиц

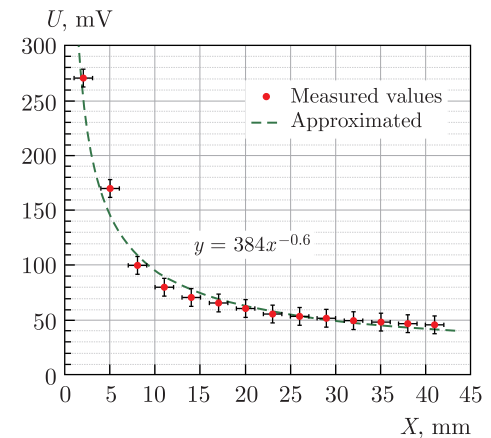


Рис. 5. Зависимость амплитуды второй гармоники U от расстояния X между пикап-электродом и формирующей линией, имитирующей пролет сгустка частиц

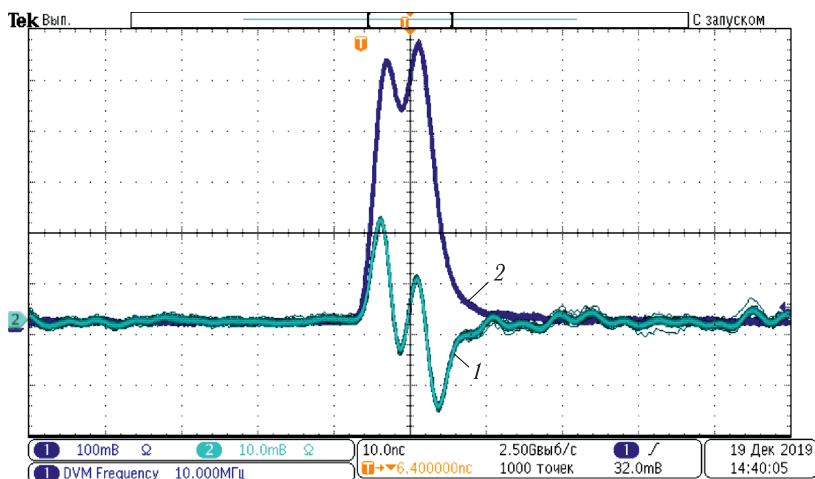


Рис. 6 (цветной в электронной версии). Отклик пикап-электрода на несущей (первой) гармонике. Бирюзовый цвет (1) — отклик пикап-электрода, синий (2) — сигнал формирующей линии (имитация пучка)

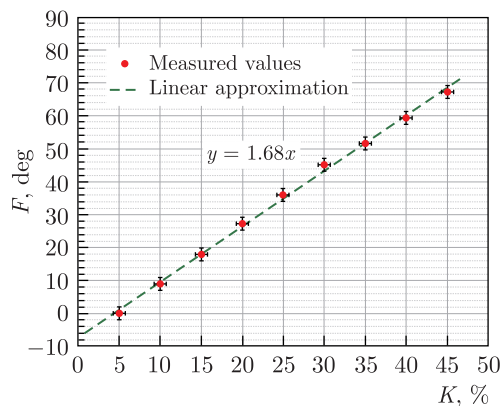


Рис. 7. Зависимость смещения фазы второй гармоники (F) от ширины импульса, имитирующего банч (K). Точкой отсчета является скважность импульса 5%, что соответствует стандартной (около 5 нс) длине банча в циклотроне

ющих различную фазу. На циклотроне ДЦ-280 предполагается набег фазы инжекции до фазы вывода около 20° в координатах ускоряющего поля [2]. Результаты этого исследования представлены на рис. 6, 7.

На основе полученных данных можно сделать вывод, что из-за сложения двух сигналов изменяется ширина комбинированного сигнала, значит, вторая гармоника будет демонстрировать некоторое смещение по фазе. Это смещение изменяется в соответствии с результатами исследования зависимости ширины импульса задающей линии, которая имитирует банч, от фазы второй гармоники (см. рис. 7).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе представлены результаты по исследованию влияния параметров пучка на сигнал, формируемый на пикап-электродах. Получены зависимости амплитуды и фазы второй гармоники сигнала от длительности импульса в форми-

рующей линии, имитирующего пучок, амплитуды сигнала задающей линии, имитирующей пролет сгустка заряженных частиц. В рамках исследования рассмотрен процесс при суперпозиции сигналов от двух импульсов с близкими фазами, регистрируемых пикап-электродом. Данное явление предоставляет возможность анализа динамики пучков, движущихся по смежным орбитам, что существенно расширяет понимание их пространственно-временных характеристик в сложных электромагнитных системах и позволяет настраивать режимы ускорения ионов.

Полученные данные позволят создать систему, благодаря которой появится возможность восстанавливать параметры пучка по сигналу с пикап-электрода в процессе ускорения.

Финансирование. Данная работа финансировалась за счет средств бюджета Лаборатории ядерных реакций Объединенного института ядерных исследований. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Калагин И. В., Иваненко И. А., Слямов А. М.* Система измерения энергии пучка ионов в циклотроне ДЦ-280 ЛЯР ОИЯИ // Ядер. физика и инжиниринг. 2015. Т. 6, № 9–10. С. 486–492.
2. *Gikal B., Gulbekian G., Ivanenko I., Kukhtin V., Lamzin E., Sytchevsky S.* The Feature of Magnetic Field Formation of the Multi-Purpose Isochronous Cyclotron DC-280 // Proc. 8th Intern. Part. Accel. Conf. (IPAC'2017), Copenhagen, Denmark, May 14–19, 2017. P. 2352–2354.

Получено 28 октября 2025 г.