

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ВЧ-СИСТЕМ СИНХРОТРОНОВ БУСТЕР–НУКЛОТРОН ПРИ ОПТИМИЗАЦИИ ЗАХВАТА И УСКОРЕНИЯ ПУЧКОВ ИОНОВ УГЛЕРОДА

*О. И. Бровка, А. А. Володин¹, А. Ю. Гребенцов, О. В. Прозоров,
Е. М. Сыресин, А. О. Сидорин*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Описываются эксперименты с основными параметрами ускоряющих ВЧ-систем бустера и нуклотрона комплекса NICA, влияющими на захват и ускорение, а также примененные при этом дополнительные аппаратные решения. Рассматриваются режимы работы ускоряющих станций бустера и нуклотрона. В частности, описывается принцип формирования закона изменения амплитуды ускоряющего напряжения при адиабатическом захвате частиц как в бустере, так и в нуклотроне, а также особенности задания последовательности импульсов синхронизации.

The experiments with the main parameters of the accelerating RF Booster and Nuclotron systems of the NICA complex, affecting the capture and acceleration, are described, as well as additional hardware solutions used in this case. The modes of operation of the Booster and Nuclotron accelerating stations are considered. In particular, the principle of formation of the law of the accelerating voltage during adiabatic capture of particles for Booster and Nuclotron is presented. In addition, the sequence of synchronization pulses has been considered.

PACS: 29.20.dk; 29.20.db; 29.27.–a

ВВЕДЕНИЕ

Ускорительный комплекс NICA (Nuclotron based Ion Collider fAcility) создается в Объединенном институте ядерных исследований для изучения свойств плотной барионной материи. В состав комплекса входят: инжекционный комплекс, синхротроны бустер и нуклотрон и коллайдер [1].

В настоящее время проводятся пусконаладочные работы на ускорительном комплексе тяжелых ионов, включающем в себя линейный ускоритель тяжелых ионов (ЛУТИ), бустер, нуклотрон и каналы перевода пучка между этими ускорителями. Пучок ионов из ЛУТИ инжектируется в бустер на «стол» магнитного поля, соответствующего энергии инъекции, равной 3,2 МэВ/нуклон, и типу ионов. На «столе»

¹E-mail: Volodin-1997@inbox.ru

пучок адиабатически группируется на пятой гармонике частоты обращения, затем поле увеличивается по параболе, переходя в линейный рост, и пучок ускоряется до промежуточного «стола», соответствующего энергии 65 МэВ/нуклон и предназначенного для электронного охлаждения ионов, где адиабатически распускается. По завершении «стола» пучок снова группируется на первой гармонике и ускоряется до энергии перевода в нуклотрон. Ускоренный сгусток системой однооборотного вывода направляется в канал перевода в нуклотрон, где происходит обдирка ионов до голых ядер. В нуклотроне сгусток сначала распускается, затем адиабатически группируется на пятой гармонике и ускоряется до необходимой энергии.

На комплексе проведены три сеанса. Первый сеанс был нацелен на физический пуск синхротрона бустер, в ходе которого был осуществлен вывод ускоряющих станций бустера на проектные параметры [2]. Второй сеанс был посвящен испытаниям канала транспортировки бустер–нуклотрон. При этом осуществлено ускорение ионов железа в бустере и испытаны различные режимы работы станций, в том числе заморозка частоты на «столе» электронного охлаждения. Третий сеанс был посвящен работе синхротронов бустер и нуклотрон в тандеме, в ходе которого были ускорены ионы углерода. Это дало возможность оценить работу цепи бустер–нуклотрон и понять эффективность захвата ускоряющих станций.

В работе приводится описание режима работы высокочастотных станций бустера и нуклотрона комплекса NICA, системы синхронизации управляющих импульсов для реализации захвата пучка, принципа формирования ускоряющего напряжения, а также способа, по которому реализовывался адиабатический захват пучка как в бустере, так и в нуклотроне. Указаны значения энергий пучков частиц и соответствующие интенсивности.

Следует отметить, что эффективность захвата и ускорения, полученная в третьем сеансе на комплексе NICA, соответствует последним мировым достижениям. Например, на установке бустер для AGS исследователям удалось достичь эффективность ускорения 65 %. При этом к моменту инжекции из EBIS в бустер интенсивность составляла 85 %, а после ускорения перед инжекцией в AGS — 65 % [3], в то время как эффективность бустера комплекса NICA составила 83 %.

Далее рассмотрим вопросы эффективности захвата и ускорения в синхротронах бустер и нуклотрон.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЗАХВАТА И УСКОРЕНИЯ В СИНХРОТРОНЕ БУСТЕР

В синхротроне бустер в третьем пусконаладочном цикле осуществлялось ускорение ионов углерода $^{12}_4\text{C}$.

С учетом опыта предыдущих сеансов, в которых ускоряющие станции эксплуатировались в разных режимах работы, были выявлены следующие замечания: неудобство изменения параметров ускоряющего напряжения, невозможность осуществления заморозки частоты на «столе» для электронного охлаждения и долгая процедура изменения режимов работы ускоряющих станций.

Для реализации корректной и удобной работы ускоряющих станций было выполнено следующее.

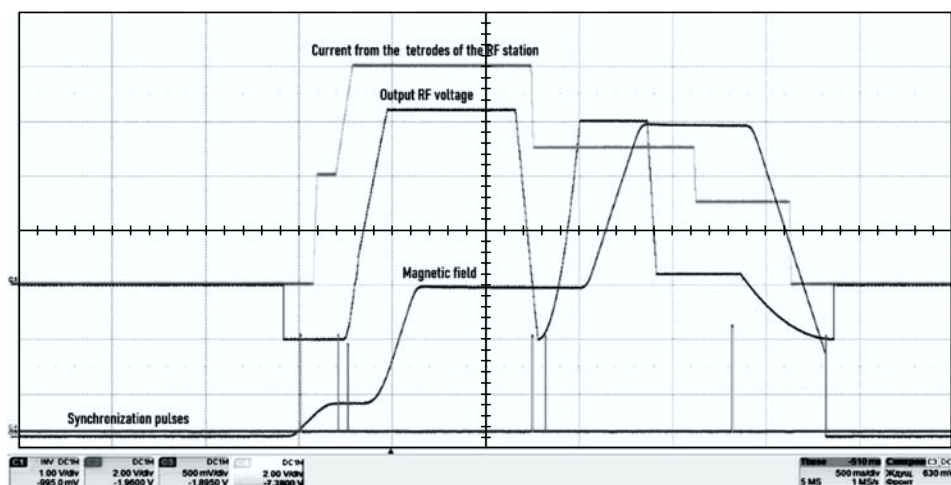


Рис. 1. Зависимость ускоряющего напряжения и магнитного поля от времени (в миллисекундах), импульсы синхронизации

1. Синхронизация процессов осуществлялась отдельным управляемым многоканальным блоком импульсных задержек.

2. Модернизирована система управления. Вместе с блоком импульсных задержек это позволило осуществить заморозку частоты на «столе», не снимая ускоряющего напряжения, и ускорить настройку и смену режимов работы ускоряющих станций.

На рис. 1 показаны импульсы синхронизации, ведущее магнитное поле, сигналы, задающие токи в лампах, и напряжение на ускоряющем зазоре. Отметим, что в процессе ускорения меняется кратность ускоряющей частоты.

Рассмотрим последовательность импульсов синхронизации. Отсчет слева направо: первый импульс — старт станций (готовность управляющей электроники к началу ускорения), второй — B_{ref} — сигнал датчика магнитного поля (в момент прихода импульса запускается связь частоты ускоряющего напряжения с магнитным полем на протяжении всего цикла), третий — старт 1 HV (начало первого этапа ускорения, включение ускоряющего напряжения на пятой кратности частоты), четвертый — старт охлаждения (заморозка ускоряющей частоты), пятый — старт 2 HV (начало второго этапа ускорения на первой кратности частоты, включение ускоряющего напряжения), шестой — конец ускорения (выключение ускоряющего напряжения), седьмой — конец цикла.

Следует отметить, что для подавления шумов во временных интервалах, не требующих ускорения, подавалось запирающее напряжение.

Ускоряющее напряжение на зазоре (рис. 2) выставлялось по следующим законам.

1. До начала участка параболического подъема магнитного поля по параболе поднималось ускоряющее напряжение до ~ 650 В. Величина ускоряющего напряжения определяет величину сепаратрисы и на постоянном магнитном поле оценивается по следующей формуле:

$$\left(\frac{\Delta p}{p}\right)^2 = \frac{2V_{\text{уск}}e}{\eta\gamma mc^2 q\pi}.$$

2. На параболическом участке магнитного поля формировался линейный рост ускоряющего напряжения в соответствии с формулами

$$V_{кр} \sim K_3 RC \frac{dB}{dt}, \quad \cos(\varphi) = \frac{V_{кр}}{V_{уск}},$$

где R — радиус в поворотных магнитах бустера, равный 14,09 м; C — периметр ускорителя 210,96 м; dB/dt — темп роста магнитного поля $\sim 0,95$ Тл/с; K_3 — коэффициент эффективности (для бустера ~ 1 , для нуклотрона $\sim 0,651$). Ускоряющее напряжение поднималось вплоть до 5 кВ.

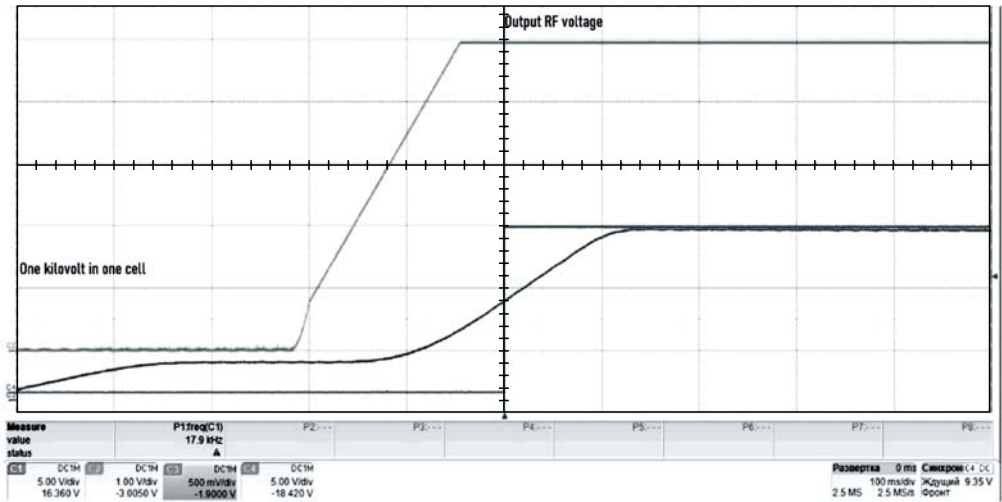


Рис. 2. Зависимость ускоряющего напряжения и магнитного поля от времени (в миллисекундах)

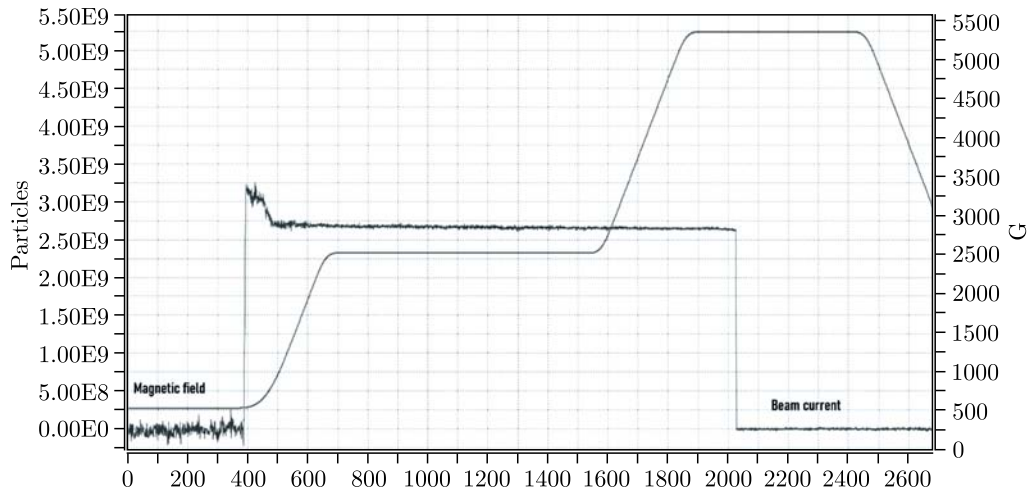


Рис. 3. Зависимость интенсивности от времени (в миллисекундах)

При такой конфигурации ускоряющего напряжения был получен график тока пучка (рис. 3).

Поле инжекции имеет величину 546,7 Гс, что соответствует энергии 3,201 МэВ/нуклон. При таких условиях начальная интенсивность составляла около $3,25 \cdot 10^9$ частиц, и пучок инжектировался в момент времени, когда отсутствовало ускоряющее напряжение. На рис. 3 показано соответствие ускоряющей частоты магнитному полю, так как потери на таких участках, как «стол» и парабола магнитного поля, практически отсутствуют. На больших полях могут появиться потери, для компенсации которых необходима обратная связь по частоте.

К моменту вывода пучка из ускорителя бустер была достигнута интенсивность приблизительно $2,7 \cdot 10^9$ частиц на поле 5332 Гс. Это соответствует энергии частиц порядка 263 МэВ/нуклон. Таким образом, можно сделать вывод, что эффективность захвата и ускорения частиц составила около 83%. Большую интенсивность можно получить, если улучшить параметры источника ионов.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЗАХВАТА И УСКОРЕНИЯ В СИНХРОТРОНЕ НУКЛОТРОН

В синхротроне нуклотрон осуществлялось ускорение ионов углерода $^{12}_6\text{C}$. Обдирка ионов, инжектируемых из бустера, происходила в канале транспортировки бустер-нуклотрон [4]. Ускоряющие станции нуклотрона обеспечивают ускорение ионов на пятой кратности в полосе частоты от 600 кГц (начальная частота) до 5,85 МГц (конечная частота).

Для стабильной работы ускоряющей станции нуклотрона были предприняты следующие шаги.

1. К моменту инжекции на ускоряющем электроде формировался уровень напряжения 500 В. Величина напряжения определялась по формулам, представленным выше. Наличие напряжения обуславливалось техническими особенностями системы АПЧ при высоких начальных частотах. При энергии ионов 263 МэВ/нуклон начальная частота ускоряющего поля на пятой кратности составляла $\sim 3,7215$ МГц.

2. Синхронизация процессов осуществлялась управляемым многоканальным блоком импульсных задержек.

Максимальное напряжение (рис. 4), которое было достигнуто на зазоре, равно 7 кВ. При большем напряжении возникали возбуждения, которые можно наблюдать на графике выходного напряжения. Предположительно данный процесс связан с деградацией тетрода предоконечного каскада усилительного тракта в процессе работы. На параболическом участке магнитного поля в соответствии с формулами, представленными выше, формировался линейный рост ускоряющего напряжения.

При таком режиме работы ускоряющих станций были получены результаты, представленные на рис. 5.

При инжекции пучка из бустера в нуклотрон магнитное поле имело величину около 2200 Гс, что соответствует энергии 263 МэВ/нуклон. Начальная интенсивность составляла $2,7 \cdot 10^9$ частиц, и пучок инжектировался в поле величиной 500 В. При энергии ионов 2,904 ГэВ/нуклон и величине магнитного поля $\sim 11\,300$ Гс, соответствующих параметрам, при которых происходил вывод ионов из нуклотрона,

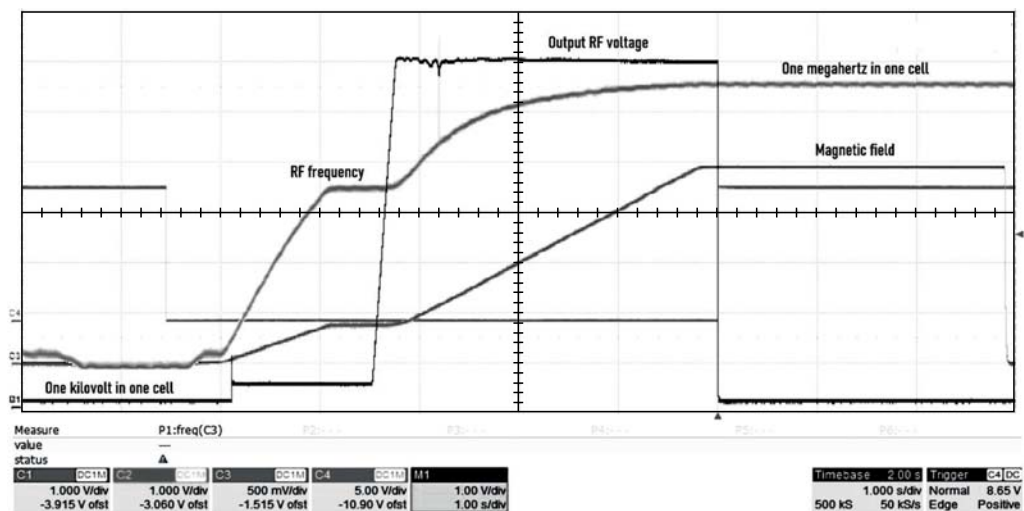


Рис. 4. Ускоряющее напряжение и магнитное поле в зависимости от частоты

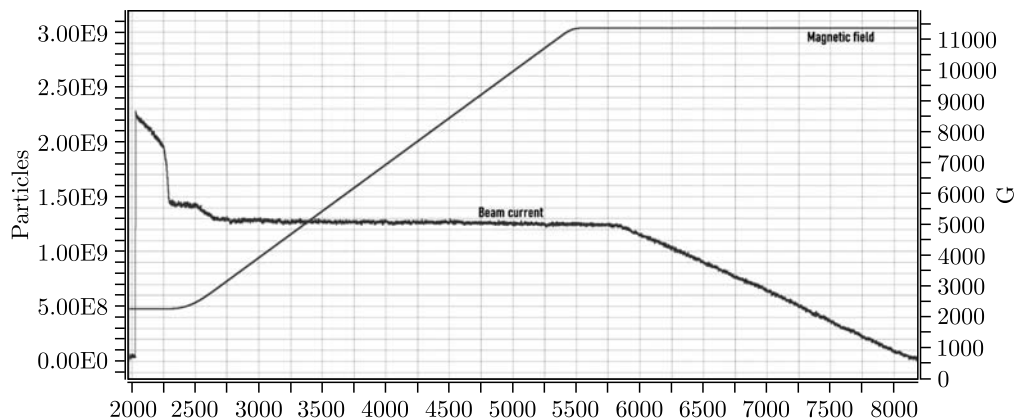


Рис. 5. Зависимость интенсивности и магнитного поля от времени (в миллисекундах)

была достигнута интенсивность около $(1,2-1,3) \cdot 10^9$ частиц. Максимальная энергия, которая была достигнута в третьем пусконаладочном сеансе, — 4,1 ГэВ/нуклон. Эффективность ускорения в нуклотроне составила $\sim 60\%$. При этом эффективность ускорения всей цепочки бустер-нуклотрон была от 40 до 50%: инжекция в бустер $3,25 \cdot 10^9$ частиц, интенсивность циркулирующего пучка к моменту вывода из нуклотрона $1,3 \cdot 10^9$ частиц.

Отметим, что в 54-м сеансе нуклотрона была достигнута энергия ионов углерода 5,1 ГэВ/нуклон. Третий сеанс был посвящен работе синхротронов бустер и нуклотрон в тандеме, поэтому задачи получения больших энергий, например 5,1 ГэВ/нуклон, не ставились.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В третьем пусконаладочном цикле была продемонстрирована стабильная работа ускоряющих систем бустера и нуклотрона. Достигнута интенсивность $(1-2) \cdot 10^9$ для ионов углерода $^{12}_6\text{C}$ в нуклотроне при энергии 2,904 ГэВ/нуклон. Эффективность захвата и ускорения в бустере составила $\sim 83\%$, а в нуклотроне $\sim 60\%$.

Следует отметить, что для улучшения параметров пучка необходимо осуществить ряд работ с ВЧ-станциями бустера и нуклотрона. Например, ввести обратную связь для коррекции закона связи частоты с магнитным полем на ускорителе бустера. Также на ускорителе нуклотрон следует заменить тетрод предоконечного каскада усилительного тракта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Sissakian A. N.* The Nuclotron-Based Ion Collider Facility at the Joint Institute for Nuclear Research // Proc. of the 18th Intern. Conf. on Particles and Nuclei (PANIC08), Eilat, Israel, Nov. 9–14, 2008;
Sissakian A. N. // Nucl. Phys. A. 2009. V. 827. P. 630C–637C.
2. *Grebentsov A. Yu., Brovko O. I., Butenko A. V., Gerklotts V. A., Malyshev A. M., Petrov V. D., Prozorov O. V., Syresin E. M., Volodin A. A., Batrakov A. M., Krutikhin S. A., Kurkin G. Yu., Petrov V. M., Pilan A. M., Rotov E., Tribendis A. G., Fatkin G. A.* Booster RF System First Beam Tests // Proc. of the 27th Russ. Part. Accel. Conf. (RuPAC'2021), Alushta, Russia, Sept. 2021. P. 370–372.
3. *Gardner Ch., Alessi J., Beebe E., Blackler I., Blaskiewicz M., Brennan J., Brown K., Butler J., Carlson Ch., Fischer W., Gassner D., Goldberg D., Hayes T., Huang H., Ingrassia P., Jamilkowski J., Kling N., Laster J., Maffei D., Mapes M., Marneris I., Marr G., Marusic A., McCafferty D., Mernick K., Minty M., Morris J., Naylor Ch., Nemesure S., Perez Sh., Pikin A., Raparia D., Roser T., Sampson P., Sandberg J., Schoefer V., Severino F., Shrey T., Smith K., Steski D., Thieberger P., Tuozzolo J., Van Kuik B., Zaltsman A., Zeno K., Zhang W.* Operation of the RHIC Injector Chain with Ions from EBIS // 6th Intern. Part. Accel. Conf. (IPAC'2015), Richmond, Virginia, USA, May 3–8, 2015.
4. *Bekhtenev E. A., Karpov G. V., Kuzminykh V. S.* BPM System for Transport Channel Booster–Nuclotron at NICA Complex // Phys. Part. Nucl. Lett. 2018. V. 15, No. 7. P. 933–936.

Получено 18 декабря 2022 г.