

Научная статья

УДК 621.384.6.01(075.8)

DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-2-71-79

Работа ВЧ-систем в ходе совместных сеансов бустера и нуклотрона*

Олег Игоревич Бровко¹, Антон Акмалович Володин²
Валерий Анатольевич Лебедев³, Евгений Михайлович Сыресин⁴
Анатолий Олегович Сидорин⁵, Георгий Александрович Фатькин⁶

¹⁻⁵Объединенный институт ядерных исследований
Дубна, Россия

⁶Козилаб Сибирь
Новосибирск, Россия

²volodin@jinr.ru

Аннотация

В статье обсуждаются результаты пусконаладочных работ ВЧ-систем инжекционного комплекса NICA и планы по их дальнейшему развитию. Подготовка инжекционного комплекса к инъекции в коллайдер требует увеличения интенсивности пучка на выходе нуклотрона примерно на два порядка. Получение требуемой интенсивности будет достигнуто накоплением пучка на энергии инъекции с использованием электронного охлаждения и уменьшением потерь при ускорении. Это потребует оптимизации всех систем комплекса, и в том числе значительного уменьшения потерь, связанных с ВЧ-системами. Полученный опыт позволяет выбрать оптимальную стратегию для дальнейшего развития ВЧ-систем. Основными направлениями являются: (1) накопление пучка в продольном фазовом пространстве при инъекции в бустер, (2) уменьшение роста продольного эмиттанта при ускорении, (3) перепуск пучка сгусток-в-сгусток из бустера в нуклотрон без роста продольного эмиттанта и (4) минимизация потерь при ускорении и перепусках пучка. Последнее требует согласования темпа ускорения с возможностями существующих ВЧ-систем.

Ключевые слова

синхротрон, ускоритель, ВЧ-система, бустер, нуклотрон, коллайдер, комплекс NICA, адиабатический захват

Для цитирования

Бровко О. И., Володин А. А., Лебедев В. А., Сыресин Е. М., Сидорин А. О., Фатькин Г. А. Работа ВЧ-систем в ходе совместных сеансов бустера и нуклотрона // Сибирский физический журнал. 2024. Т. 19, № 2. С. 71–79. DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-2-71-79

*Статья подготовлена по материалам конференции Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC'23), Budker INP, 11–15 September 2023.

Operation of Rf Systems During Joint Booster and Nuclotron Sessions

Oleg I. Brovko¹, Anton A. Volodin², Valery A. Lebedev³
Evgeny M. Syresin⁴, Anatoly O. Sidorin⁵, Georgy A. Fatkin⁶

¹⁻⁵ JINR, Dubna, Russian Federation

⁶Cosylab Siberia, Novosibirsk, Russian Federation

²volodin@jinr.ru

Abstract

The article discusses the results of commissioning of RF systems of the NICA injection complex and plans for their further development. The preparation of the injection complex for injection into the collider requires an increase in the beam intensity in the Nuclotron outlet by about two orders of magnitude. Obtaining the required intensity will be achieved by accumulating the beam on injection energy using electronic cooling and reducing acceleration losses. This will require optimization of all systems of the complex, including a significant reduction in losses associated with RF systems. The experience allows us to choose the optimal strategy for the further development of HF systems. The main directions are: (1) accumulation of the beam in the longitudinal phase space during injection into the Booster, (2) reduction of the growth of the longitudinal emittance during acceleration, (3) bypass of the beam clot-in-clot from the Booster to the Nuclotron without growth of the longitudinal emittance, and (4) minimizing losses during acceleration and beam bypasses. The latter requires matching the acceleration rate with the capabilities of existing HF systems.

Keywords

synchrotron, accelerator, RF system, Booster, Nuclotron, collider, complex NICA, adiabatic capture

For citation

Brovko O., Volodin A., Lebedev V., Syresin E., Sidorin A., Fatkin G. Operation of Rf Systems During Joint Booster and Nuclotron Sessions. *Siberian Journal of Physics*, 2024, vol. 19, no. 2, pp. 71–79 (in Russ.). DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-2-71-79

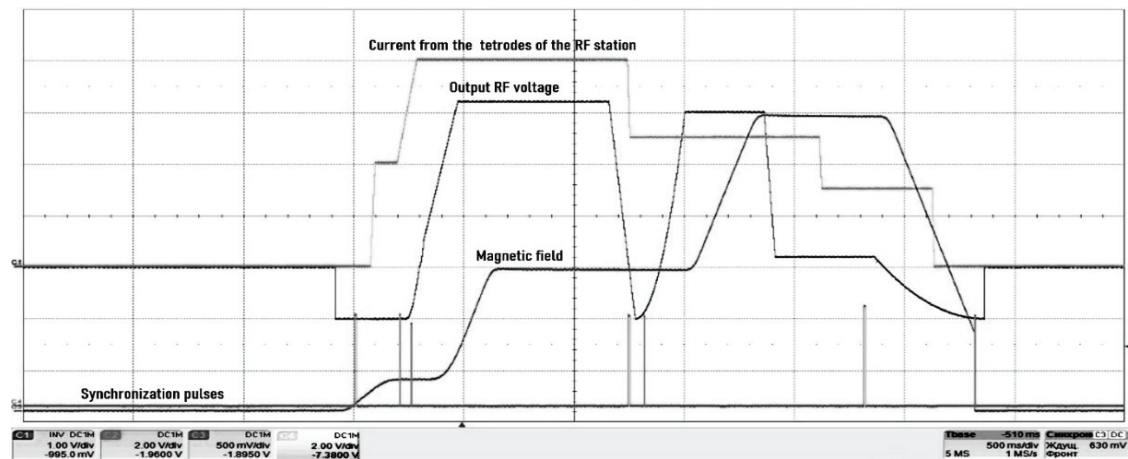
Введение

Комплекс NICA (Nuclotron based Ion Collider fAcility) создается в Объединенном институте ядерных исследований и предназначен для изучения свойств плотной барионной материи [1]. Было проведено четыре пусконаладочных сеанса, в ходе которых ускоряющие станции отработали в штатном режиме (рис. 1, а, б) [2]. Подготовка инжекционного комплекса к коллайдерным экспериментам требует увеличения интенсивности на выходе нуклотрона примерно на 2 порядка. Получение требуемой интенсивности будет достигнуто накоплением пучка на энергии инъекции с использованием электронного охлаждения и уменьшением потерь при ускорении. Это потребует существенного изменения режимов работы линейного ускорителя и бустера и оптимизации работы всех систем комплекса, и в том числе работы ВЧ-систем бустера и нуклотрона.

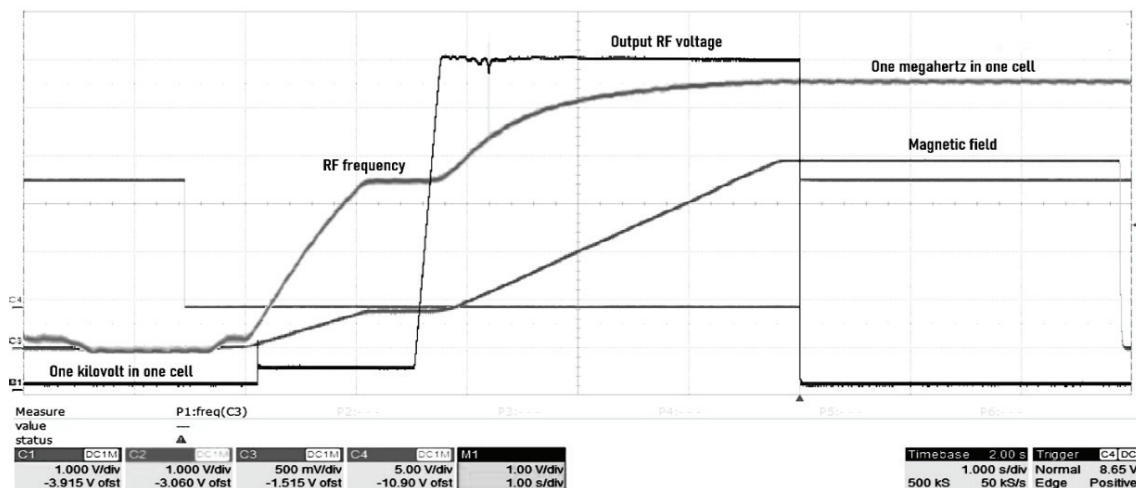
В статье обсуждаются результаты пусконаладочных работ ВЧ-систем инжекционного комплекса NICA и планы по их дальнейшему развитию. Основными направлениями являются: 1) накопление пучка в продольном фазовом пространстве при инъекции в бустер; 2) предотвращение роста продольного эмиттанта при ускорении; 3) перепуск пучка сгусток-в-сгусток из бустера в нуклотрон без роста продольного эмиттанта; 4) минимизация потерь при ускорении и перепусках пучка. Последнее требует согласования темпа ускорения с возможностями существующих ВЧ-систем.

Накопление пучка в продольном фазовом пространстве при инъекции в бустер

Штатный режим ВЧ-станций характеризуется полосой частот $0,58 \div 5,85$ МГц со сменой кратности из-за недостаточной полосы перестройки частоты ВЧ-системы [3]. В процессе 4-го пусконаладочного сеанса была проверена возможность работы ускоряющих станций на час-



a



б

Рис. 1. Зависимость ускоряющего напряжения и магнитного поля от времени в миллисекундах, импульсы синхронизации (бустер) (а). Зависимость ускоряющего напряжения, магнитного поля и ускоряющей частоты от времени в миллисекундах (нуклотрон) (б)

Fig. 1. Dependence of accelerating voltage and magnetic field on time in milliseconds, synchronization pulses (booster) (a). Dependence of accelerating voltage, magnetic field and accelerating frequency on time in milliseconds (nuclotron) (б)

тоте ~ 120 кГц, которая много меньше минимальной номинальной частоты и равна частоте обращения частиц на энергии инжекции. Было достигнуто напряжение 2 кВ длительностью 500 мс, при этом усилители работали на 60 % от максимальной мощности. Отказ от режима, при котором происходила смена кратности, открывает возможность избежать перебанчировок и провести ускорения на первой гармонике частоты обращения на протяжении всего цикла. Помимо избегания перебанчировок, появляется допустимость эффективной реализации многоразовой инжекции.

Режим многоразовой инжекции реализуется с помощью системы электронного охлаждения [4] и является оптимальным для накопления пучка в продольном фазовом пространстве. При этом половина орбиты отведена для накопленного ядра, а вторая используется для инжекции новой порции. Поскольку длительность охлаждения (≈ 100 мс) много меньше длительности цикла ускорения (≈ 5 с), это позволяет многократно увеличить производительность инжекционного комплекса. Удлинение цикла ускорения из-за уменьшения ускоряющего напряжения на низких частотах компенсируется отсутствием перегруппировки сгустков.

Основными факторами оценки амплитуды напряжения ВЧ при многократной инжекции являются:

- собственное поле пучка;
- скорость электронного охлаждения.

Предотвращение роста продольного эмиттansa при ускорении

Для устранения потерь ионного пучка при ускорении необходимо предотвращать рост продольного эмиттansa. Продолжительная работа как силовой аппаратуры, так и маломощной электроники сопровождается дрейфом их параметров во времени.

В 4-м пусконаладочном сеансе на комплексе NICA был замечен процесс роста продольного эмиттansa из-за неточных коэффициентов связи магнитного поля с опорным сигналом ускоряющей частоты, приводящих к резкому изменению фазы ВЧ-напряжения. Возбуждались синхротронные колебания на столе вывода бустера (рис. 2), оказывающие негативное влияние на интенсивность ионного пучка при захвате в нуклотроне вследствие роста эмиттansa.

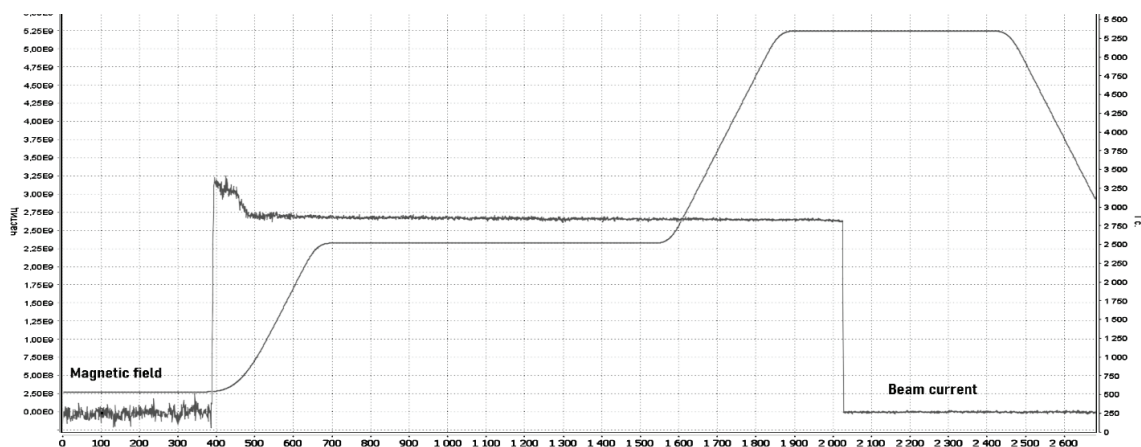


Рис. 2. Зависимость тока пучка и магнитного поля от времени миллисекундах (бустер)

Fig. 2. Dependence of beam current and magnetic field on time in milliseconds (booster)

Анализ процессов, приводящих к неэффективному захвату пучка в нуклотроне, содержал задачу измерения синхротронной частоты. Измерение синхротронной частоты производилось с помощью быстрого трансформатора тока. Оцифровка запускалась в конце цикла ускорения в бустере. Длительность сбора данных 210 мс, частота дискретизации 50 МГц (рис. 3). Измерение позволило обнаружить резкое изменение фазы пучка, которое впоследствии подтвердилось на датчике положения пучка (рис. 4).

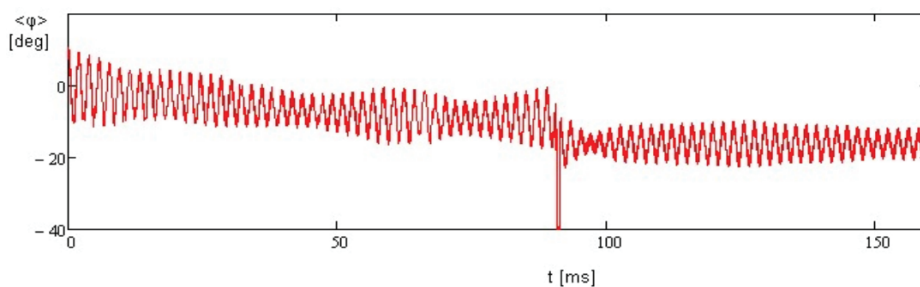


Рис. 3. Синхротронная частота от времени в миллисекундах (бустер)

Fig. 3. Synchrotron frequency versus time in milliseconds (booster)

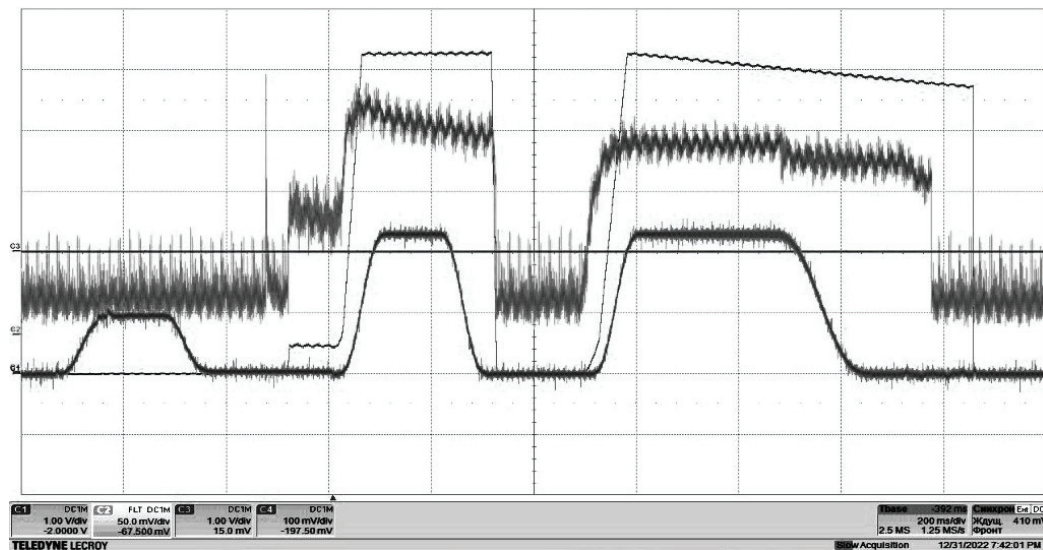


Рис. 4. Сигнал с датчика положения пучка, время в миллисекундах (бустер)

Fig. 4. Signal from the beam position sensor, time in milliseconds (booster)

Для повышения эффективности анализа процессов, влияющих на захват пучка, было решено разработать фазовый монитор, позволяющий наблюдать фазу пучка относительно фазы ВЧ и модернизировать датчик положения пучка.

Для предотвращения роста продольного эмиттанта разрабатывается обратная связь по положению пучка, основными функциями которой будут компенсация как медленных процессов, связанных с уходом параметров на длинном промежутке времени, так и быстрых процессов, связанных с мгновенными изменениями.

Перепуск пучка сгусток-в-сгусток из бустера в нуклотрон без роста продольного эмиттанта

В 4-м пусконаладочном сеансе был реализован режим перепуска пучка сгусток-в-сгусток из бустера в нуклотрон. Алгоритм перепуска состоял в том, чтобы за 10^3 периодов ВЧ-напряжения до вывода пучка в бустере изменить на определенную величину фазу ВЧ в нуклотроне (рис. 5). Задержка, выраженная в периодах ВЧ-напряжения, определялась скоростью перестройки четвертьволнового резонатора ускоряющих станций нуклотрона (рис. 6).

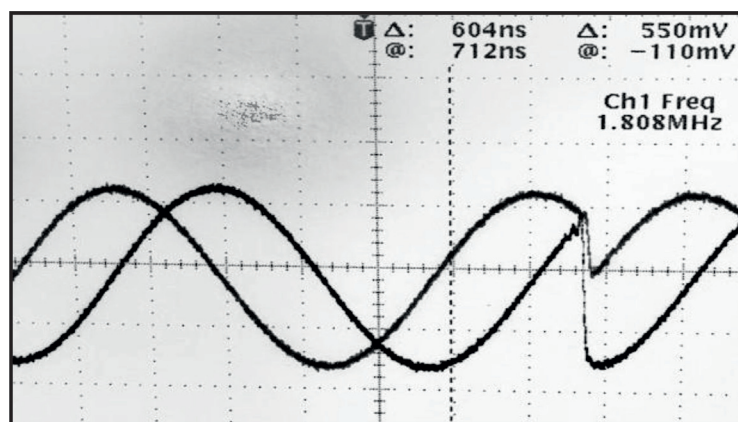


Рис. 5. Сдвиг фазы в ВЧ-напряжения нуклотроне

Fig. 5. Phase shift in the RF voltage of the nuclotron

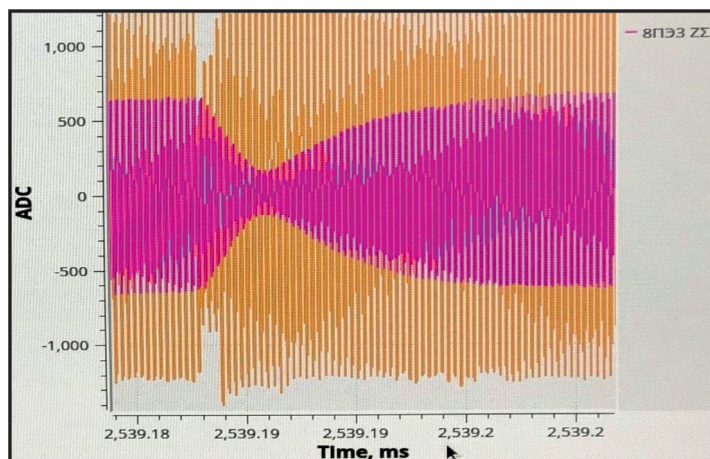


Рис. 6. Зависимость амплитуды ВЧ-напряжения от времени в миллисекундах
Fig. 6. Dependence of the RF voltage amplitude on time in milliseconds

Ускоряющие станции работали на 4-й кратности, а перепуск осуществлялся в первую сепаратрису относительно импульса выводного кикера. Эффективное напряжение на ускоряющем зазоре имело величину 2,5 кВ.

В последующих сеансах будет применена новая система генерации опорного сигнала для ВЧ-систем ускорительного комплекса NICA, которая позволит более гибко выставлять задержку по фазе для перепуска из сгустка в сгусток.

Минимизация потерь при ускорении и перепусках пучка

Для минимизации потерь при ускорении и перепусках пучка необходимо точное согласование магнитного поля с ВЧ-напряжением. Реализация адиабатического захвата, проведенная в предыдущих пусконаладочных сеансах, требует оптимизации. Для оценки процессов, происходящих во время предыдущих сеансов, когда адиабатический захват не был настроен либо требовал оптимизации, рассмотрим модель, при которой напряжение в 10 кВ включается на постоянном магнитном поле до начала подъема. Энергия инжекции 3,2 МэВ/н, охлаждение осуществляется на постоянном участке магнитного поля при энергии ионов 64 МэВ/н, $A/Z \sim 4,43$ (рис. 7). На рис. 8 продемонстрированы потери при реализации схожего режима в ну-клотроне.

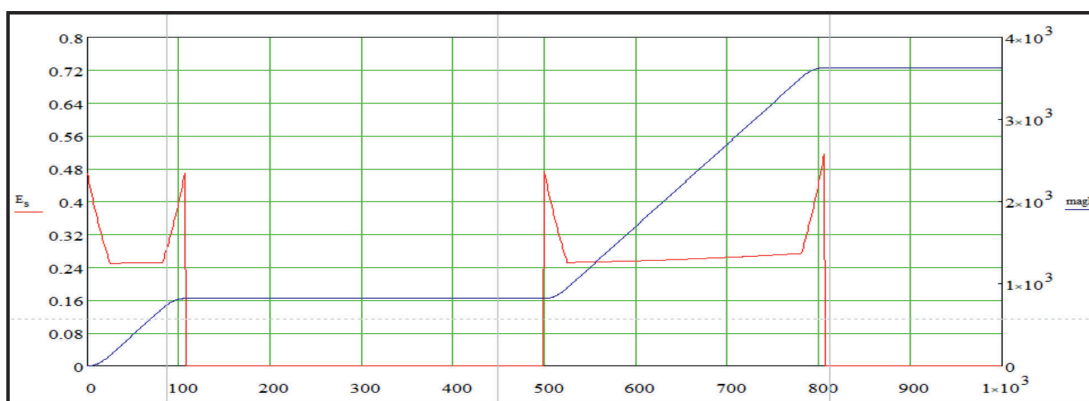


Рис. 7. Зависимость продольного акцептанса от магнитного поля при постоянной амплитуде ВЧ-напряжения
Fig. 7. Dependence of the longitudinal acceptance on the magnetic field at a constant amplitude of the RF voltage

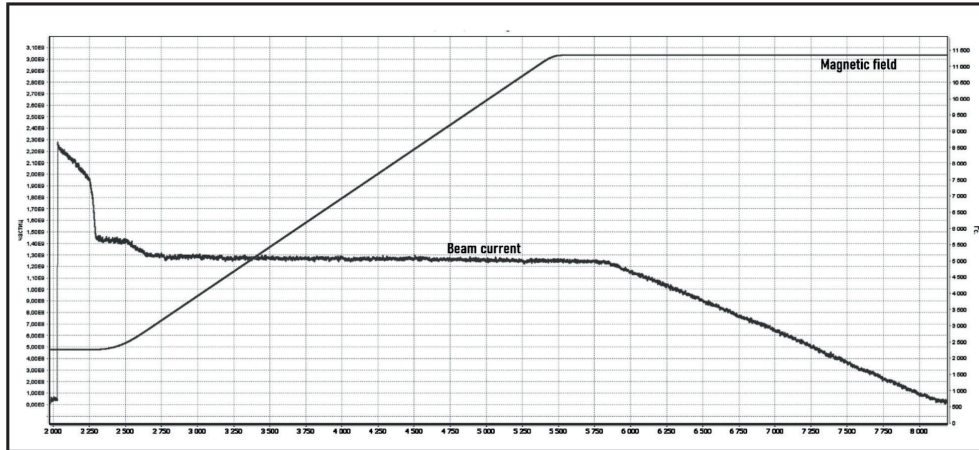


Рис. 8. Зависимость тока пучка и магнитного поля от времени в миллисекундах
Fig. 8. Dependence of the beam current and magnetic field on time in milliseconds

Для сравнения рассмотрим режим адиабатического захвата, настроенный в бустере (рис. 9), и соответствующую интенсивность на рис. 10.

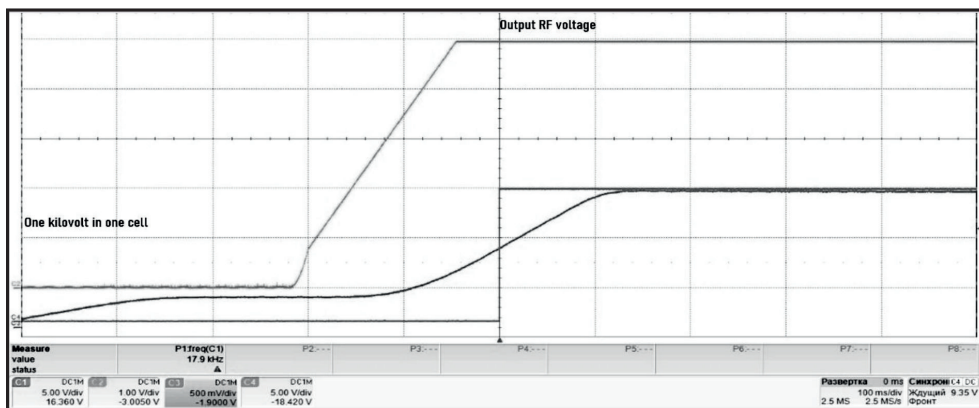


Рис. 9. Зависимость ускоряющего напряжения и магнитного поля от времени в миллисекундах
Fig. 9. Dependence of accelerating voltage and magnetic field on time in milliseconds

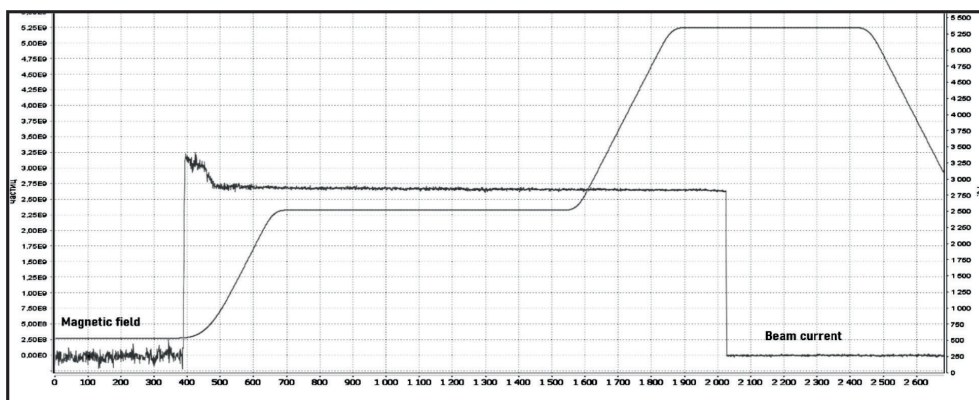


Рис. 10. Зависимость тока пучка и магнитного поля от времени миллисекундах (бустер)
Fig. 10. Dependence of beam current and magnetic field on time in milliseconds (booster)

Таким образом, для минимизации потерь при ускорении и перепусках пучка необходимо точно согласовывать магнитное поле с амплитудой ускоряющего напряжения.

К будущему пусконаладочному сеансу разрабатывается программа, основной задачей которой будет расчет параметров ВЧ-напряжения в зависимости от производной магнитного поля, что позволит улучшить эффективность захвата пучков ионов.

Заключение

По итогам прошедших пусконаладочных сеансов ВЧ-системы комплекса NICA надежно отработали в штатном режиме. Но стоит отметить, что для улучшения эффективности захвата пучков ионов режимы работы ускоряющих станций следует оптимизировать, а в отдельных случаях изменить. Это потребует как новых разработок, так и модернизации существующих аппаратных решений.

Список литературы

1. **Сисакян А. Н.** The nuclotron-based ion collider facility at the Joint Institute for Nuclear Research». Part of Particles and nuclei. Proceedings, 18th International Conference, PANIC08, Eilat, Israel, November 9-14, 2008, 630C-637C. DOI: 10.1016/j.nuclphysa.2009.05.138
2. **Бровко О. И., Володин А. А., Гребенцов А. Ю., Прозоров О. В., Сыресин Е. М., Сидорин А. О.** Исследование режимов работы ВЧ-систем синхротронов бустер-нуклотрон при оптимизации захвата и ускорения пучков ионов углерода. Письма в ЭЧАЯ // ОИЯИ, Письма в ЭЧАЯ. 2023. Т. 20, № 4(249). С. 650–656.
3. **Гребенцов А. Ю., Бровко О. И., Бутенко А. В., Герклотц В. А., Малышев А. М., Петров В. Д., Прозоров О. В., Сыресин Е. М., Володин А. А., Батраков А. М., Крутихин С. А., Куркин Г. Ю., Петров В. М., Пилан А. М., Ротов Е., Трибендис А. Г., Фаткин Г. А.** Booster RF System First Beam Tests // Proc. 27th Russian Particle Accelerator Conf. (RuPAC2021), Alushta, Russia, Sep. 2021. P. 370372. DOI: 10.18429/JACoW-RuPAC2021-WEPSC14.
4. **Melnikov S. A., Ahmanova E. V., Butenko A. V., Kobets A. G., Meshkov I. N., Orlov O. S., Osipov K. G., Semenov S. V., Sergeev A. S., Sidorin A. A., Sidorin A. O., Syresin E. M., Ivanov A. V.** Features of the electron cooling system of the NICA booster // 27th Russian Particle Acc. Conf. RuPAC2021, Alushta, Russia. JACoW Publishing. doi:10.18429/JACoW-RuPAC2021-TUPSB04.

References

1. **Sisakian A. N.** Installation of an ion collider based on a Nuclotron at the Joint Institute for Nuclear Research. Part of the particles and nuclei. Proceedings of the 18th International Conference, PANIC 08, July, Israel, November 9-14, 2008, 630 C-637C. DOI: 10.1016/j.nuclphysa.2009.05.138.
2. **Brovko O. I., Volodin A. A., Grebentsov A. Y., Prozorov O. V., Syresin E. M., Sidorin A. O.** Investigation of the modes of operation of RF synchrotron Booster-Nuclotron systems in optimizing the capture and acceleration of carbon ion beams. *Letters to ECHAYA*, 2023, vol. 20, no. 4(249), pp. 650656. (in Russ.)
3. **Grebentsov A. Y., 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. Y., Petrov V. M., Pilan A. M., Rotov E., Tribendis A. G., Fatkin G. A.** Booster RF System First Beam Tests. *Proc. 27th Russian Particle Accelerator Conf. (RuPAC'21)*, Alushta, Russia, Sep. 2021, pp. 370372, DOI:10.18429/JACoW-RuPAC2021-WEPSC14. E. V.

4. **Melnikov S. A., Ahmanova, Butenko A. V., Kobets A. G., Meshkov I. N., Orlov O. S., Osipov K. G., Semenov S. V., Sergeev A. S., Sidorin A. A., Sidorin A. O., Syresin E. M., Ivanov A. V.** Features of the electron cooling system of the NICA booster. *27th Russian Particle Acc. Conf. RuPAC2021*, Alushta, Russia. JACoW Publishing. doi:10.18429/JACoW-RuPAC2021-TUPSB04.

Сведения об авторах

Бровко Олег Игоревич, начальник научно-экспериментального отдела радиоэлектронных систем

Володин Антон Акмалович, начальник группы эксплуатации и разработки систем управляющей электроники

Лебедев Валерий Анатольевич, доктор физико-математических наук, заместитель начальника отделения по научной работе,

Сыресин Евгений Михайлович, доктор физико-математических наук, главный инженер ускорительного комплекса NICA

Сидорин Анатолий Олегович, кандидат физико-математических наук, заместитель начальника отделения по научной работе

Фаткин Георгий Александрович, кандидат технических наук

Information about the Authors

Oleg I. Brovko, Head of the Scientific and Experimental Department of Radio electronic Systems

Anton A. Volodin, Head of the Group for Operation and Development of Control Electronics Systems

Valery A. Lebedev, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Deputy Head of the Department for Scientific Work

Evgeny M. Syresin, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Chief Engineer of the NICA Accelerator Complex

Anatoly O. Sidorin, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Deputy Head of the Department for Scientific Work

Georgy A. Fatkin, Candidate of Technical Sciences

*Статья поступила в редакцию 19.09.2023; одобрена после рецензирования 02.10.2023;
принята к публикации 04.03.2024*

*The article was submitted 19.09.2023; approved after reviewing 02.10.2023;
accepted for publication 04.03.2024*