

Р9-2013-140

ИТОГИ 46-ГО И 47-ГО СЕАНСОВ НУКЛОТРОНА

Аверичев А. С., Агапов Н. Н., Алфеев А. В., Андреев В. А., Базанов А. М.,
Батин В. И., Блинов Н. А., Бровко О. И., Бутенко А. В., Валькович А.,
Василишин Б. В., Вишневский А. В., Волков В. И., Галимов А. Р.,
Говоров А. И., Горбачев Е. В., Гребенцов А. Ю., Донец Д. Е., Елисеев А. В.,
Иванов Е. В., Исадов В. А., Карпинский В. Н., Кириченко А. Е., Кобец А. Г.,
Коваленко А. Д., Козлов О. С., Кудашкин А. В., Кунченко О. А.,
Лебедев Н. И., Левтеров К. А., Мешков И. Н., Михайлов В. А.,
Мончинский В. А., Нестеров А. В., Ноженко Ю. М., Омеляненко М. М.,
Осипенков А. Л., Пиляр Н. В., Пивин Р. В., Понкин Д. А., Романов С. В.,
Рукояткин П. А., Рукояткина Т. В., Сальников В. В., Семин Н. В.,
Слепнев В. М., Слепнев И. В., Сидорин А. О., Смирнов А. В., Смирнова З. И.,
Трубников Г. В., Тузиков А. В., Филиппов А. В., Филиппов Н. А.,
Ходжибабян Г. Г., Шурхно Н. А., Шурьгин А. А.

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Карпов Г. В.

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

Штассен Р., Катаяма Т.

Исследовательский центр, Юлих, Германия

Бонев И., Гешков И., Тонев Д., Цаков И.

Институт ядерных исследований и ядерной энергетики БАН, София

Минчев М.

Софийский университет им. Св. Климента Охридского, София

Ондриш Л., Крушински Д.

Институт проблем измерений САН, Братислава

Хедбавны П.

«Вакуум-Прага», Чехия

Герек И., Юрнечка А.

*Электротехнический исследовательский и проектный институт (EVPU a.s.),
Нова Дубница, Словакия*

Гогов Д. С.

Киевский национальный университет им. Т. Г. Шевченко, Украина

Аверичев А. С. и др.

P9-2013-140

Итоги 46-го и 47-го сеансов нуклотрона

46-й сеанс работы нуклотрона был проведен в период с 15 ноября по 24 декабря 2012 г., 47-й сеанс — с 20 февраля по 28 марта 2013 г. В результате работ по поэтапному повышению энергии пучок дейтронов ускорен до 5,1 ГэВ/нуклон, а на энергии 4,8 ГэВ/нуклон реализован медленный вывод. Продолжались работы по исследованию стохастического охлаждения в рамках разработки этой системы для коллайдера NICA, в ходе 47-го сеанса продемонстрирован эффект охлаждения продольной степени свободы циркулирующего пучка дейтронов. Введен в опытную эксплуатацию экспериментальный сегмент автоматической системы управления, разработанный в системе Tango, принятой за основу на ускорительном комплексе NICA. Эти и другие результаты «ускорительных» смен сеансов приводятся в данном отчете.

Работа выполнена в Лаборатории физики высоких энергий им. В. И. Векслера и А. М. Балдина ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2013

Averichev A. S. et al.

P9-2013-140

Results of the 46th and 47th Nuclotron Runs

The 46th Nuclotron run was performed from 15 November to 24 December, 2012, the 47th run — from 20 February to 28 March, 2013. As a result of works for energy increase, the deuteron beam was accelerated up to 5.1 GeV/u, the slow beam extraction was realized at 4.8 GeV/u. Investigations of stochastic cooling were prolonged in the framework of R&D works for the NICA collider. Cooling of the longitudinal degree of freedom of the circulating beam was obtained during run No. 47. Experimental segment of the NICA automatic control system based on Tango concept was put into the test operation. These and other results of the machine development shifts are presented in this report.

The investigation has been performed at the Veksler and Baldin Laboratory of High Energy Physics, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2013

ВВЕДЕНИЕ

В ходе 46-го и 47-го сеансов сочетались работы, направленные на расширение возможностей ускорительного комплекса для проведения текущей программы физических исследований, и тестирование оборудования и режимов работы вновь создаваемых установок комплекса NICA — бустера и коллайдера.

Из наиболее заметных достижений «ускорительных» смен сеансов можно отметить следующие.

- Введена в эксплуатацию новая система детектирования переходов в нормально проводящую фазу магнитов нуклотрона.
- Пучок дейтронов ускорен до 5,1 ГэВ/нуклон, осуществлен вывод пучка для экспериментов по программе физических исследований на энергии 4,8 ГэВ/нуклон.
- Более чем на порядок снижены пульсации поля на «столе», продемонстрирована возможность получения коэффициента постоянного тока при медленном выводе порядка 90 % при длительности растяжки до 10 с.
- Продемонстрирована возможность ускорения пучка при темпе роста поля 8 кГс/с.
- Введен в опытную эксплуатацию экспериментальный сегмент АСУ ускорительного комплекса NICA на основе Tango.
- Получен эффект стохастического охлаждения продольной степени свободы пучка методом гребенчатого фильтра.

Результаты этих и других работ, выполненных в ходе сеансов, приводятся в данном отчете.

1. КРАТКИЙ ОБЗОР СЕАНСОВ

Охлаждение кольца нуклотрона в 46-м сеансе работы было начато 15 ноября 2012 г. Сеанс был завершен 24 декабря, на два дня раньше первоначально запланированного срока, из-за обнаруженной неисправности одного из мощных тоководов в магнитно-криостатную систему. 47-й сеанс работы нуклотрона был проведен в период с 20 февраля по 28 марта 2013 г. Для завершения работ по программе «Нуклотрон–NICA» сеанс был продлен на три дня по сравнению с начальной запланированной продолжительностью.

Официальной продолжительностью сеанса считается период времени от начала охлаждения до начала отепления кольца нуклотрона. В сумме для 46-го и 47-го сеансов она составила около 2000 ч. В табл. 1.1 для справки приведены также полное время работы ускорительного комплекса в сеансах (с учетом подготовительных работ, требующих круглосуточного дежурства персонала) и время работы с пучком. Примерно 60 % пучкового времени было выделено на проведение экспериментов в рамках программы физических исследований. Программа намеченных на сеанс физических исследований выполнена практически полностью. Количество внеплановых остановок по сравнению с предыдущими сеансами было существенно уменьшено.

Таблица 1.1. Статистика работы ускорительного комплекса ЛФВЭ в 46-м и 47-м сеансах (часы)

Виды работ	№ 46	№ 47
Работа комплекса, включая откачку, настройку ЛУ-20	1100	1020
Продолжительность сеанса, включая охлаждение	940	866
Работа нуклотрона	792	695
Развитие ускорителя, настройки, ремонт	308	304
Программа физических исследований	484	391

Основная часть исследований проводилась на пучках дейтронов. Возможность работы с другими сортами легких ионов в настоящее время ограничивается техническим состоянием высокочастотного генератора линейного ускорителя ЛУ-20. Улучшение ситуации ожидается с переходом на модуляторы, основанные на твердотельных ключах, и с вводом в эксплуатацию нового лазерного источника, тестирование лазера для которого находится в завершающей стадии.

Интенсивность ускоренного пучка определялась требованиями экспериментальных установок и составляла от 10^8 до примерно $3 \cdot 10^{10}$ частиц за цикл, энергия — от нескольких сотен МэВ до 4,8 ГэВ/нуклон.

Начиная с 46-го сеанса была обеспечена возможность осуществления медленного вывода с высокой эффективностью и качеством, соответствующим лучшим мировым показателям. Однако в настоящее время техническое состояние некоторых подсистем медленного вывода (это в первую очередь касается электростатического септума и источников питания линз резонансной раскачки) не позволяет гарантировать стабильность режимов на протяжении всего сеанса. Для снижения остроты проблемы в ходе 47-го сеанса были отработаны и опробованы в экспериментах несколько резервных методик вывода пучка. По заявкам физиков реализованы некоторые новые уникальные режимы работы, например, вывод пучка при минимальной (60–100 мс) растяжке.

Постепенно в практику работы входит активное привлечение к участию в ускорительных сменах ведущих специалистов из других научных центров. Так, например, в работах по стохастическому охлаждению в 46-м сеансе принимали участие специалисты из Германии, а тестирование элементов ускоряющей системы бустера в 47-м сеансе проводилось совместно со специалистами из ИЯФ СО РАН им. Г. И. Будкера.

2. РАБОТЫ ПО ПОВЫШЕНИЮ ЭНЕРГИИ ПУЧКА

2.1. Проблемы, решаемые при повышении энергии. В ходе 42-го сеанса, завершающего проект «Нуклотрон-М», была продемонстрирована возможность стабильной и безопасной работы основного источника питания структурных магнитов и линз, включенных последовательно, и системы эвакуации энергии вплоть до тока 6 кА, соответствующего полю дипольных магнитов 2 Тл [1]. Кроме того, было подтверждено отсутствие деградации свойств сверхпроводящих магнитов за длительный период эксплуатации. После этого ускорение и вывод пучка до энергии вплоть до максимальной проектной сводится к решению проблем, которые можно условно разбить на три группы.

Первая из них касается развития систем ускорителя, ответственных за устойчивое ускорение и вывод пучка. В первую очередь это относится к системе питания структурных магнитов и линз, которая кроме основного мощного источника включает в себя два источника тока меньшей мощности: разбаланса между дипольными магнитами и линзами и разбаланса между фокусирующими и дефокусирующими линзами. Эти источники должны обеспечить гибкое управление частотами бетатронных колебаний частиц, стабильное положение рабочей точки в течение цикла ускорения и эффективное подавление шумов на «столе» поля для обеспечения качества медленного вывода. Состояние работ по развитию этих источников приводится в следующем разделе. Не менее важной является задача обеспечения работы устройств системы медленного вывода при больших магнитных полях, в том числе электростатического септума при повышенных уровнях напряжения. К началу 43-го сеанса на септум был установлен новый источник высоковольтного питания, испытанный на стенде до напряжения 200 кВ [1]. В результате тренировки в 43-м сеансе напряжение на септуме было доведено примерно до 120 кВ. К сожалению, в последующих сеансах заметного прогресса по повышению напряжения достигнуто не было. А в ходе 47-го сеанса при попытке реализации медленного вывода при энергии, близкой к 5 ГэВ/нуклон, произошел пробой изолятора септума, и до завершения сеанса медленный вывод осуществлялся в нештатном режиме, с эффективностью не более 20 %. По завершении сеанса участок медленного вывода был вскрыт и проведено исследование состояния септума. Установлено, что с высокой вероятностью пробой был связан с

дефектом, изначально присутствовавшим в конструкции изолятора. В настоящее время изготовлен и установлен новый изолятор, однако для обеспечения надежной работы системы медленного вывода необходимо изготовить новый септум, разработка которого уже начата. Установить его на нуклотроне планируется в течение ближайших двух лет, до начала эксперимента VM@N.

Вторая группа проблем связана с исследованием и поэтапным улучшением состояния магнитной системы нуклотрона. Возможность систематической работы в этом направлении появилась после ввода в эксплуатацию в 46-м сеансе новой системы датчиков перехода в нормально проводящую фазу [2]. Ее использование позволяет анализировать все случаи срабатывания защит, выявлять и устранять случаи срабатывания по наводкам, анализировать динамику переходов в зависимости от их места и фазы цикла поля. В завершающих сменах 46-го сеанса проводилось интенсивное тестирование магнитной системы нуклотрона при повышенном уровне поля, в результате которого была выявлена неисправность одного из 12 мощных тоководов. В промежутке между сеансами токовод был заменен на имеющийся резервный, испытанный на максимальном токе. Анализ этого инцидента еще раз подтвердил, что тоководы, изготовленные более 20 лет назад, по экономическим характеристикам и по надежности устарели и морально, и физически. В ближайшие два года планируется их поэтапная замена на новые. В 47-м сеансе набор статистики переходов был продолжен в ходе тестирования магнитной системы на полях до 1,9 Тл, длительности «столов» до 10 с и с различными темпами роста поля. На выявленных «слабых» местах в промежутке между сеансами были проведены профилактические работы.

И третья группа проблем связана с изучением и оптимизацией динамики частиц в условиях, когда заметную роль начинают играть эффекты, связанные с насыщением ярма магнитов и линз. С первым из таких эффектов пришлось столкнуться в ходе 44-го сеанса, когда примерно 12 ч работы в цикле с полем на «столе» около 1,5 Тл привели к резкому увеличению потерь на первых оборотах после инжекции примерно на два порядка [3]. В 45-м сеансе было установлено, что причиной этого эффекта является накопление тока в короткозамкнутом сверхпроводящем витке, расположенном в магните Ламбертсона системы медленного вывода. Перед сеансом на виток была установлена нагревательная спираль, состоящая из 100 витков константановой проволоки с общим сопротивлением примерно 8 Ом. Когда при работе с магнитным полем до 1,5 Тл вновь наблюдалось снижение эффективности захвата инжектируемого пучка, этот эффект удалось устранить путем включения нагревателя на 15–20 мин. В дальнейшем программа физических экспериментов при энергии дейтронов 4 ГэВ/нуклон была выполнена при постоянно включенном нагревателе. В завершение 45-го сеанса медленный вывод был реализован на энергии 4,5 ГэВ/нуклон. Однако дальнейшее продвижение по энергии представлялось проблематичным без детального исследования этого эффекта.

2.2. Исследование процессов в короткозамкнутом сверхпроводящем витке магнита Ламбертсона. Короткозамкнутый (КЗ) сверхпроводящий (СП) виток в апертуре циркулирующего пучка магнита Ламбертсона предназначен для компенсации влияния рассеянного поля, проникающего сквозь железный септум магнита при его насыщении. При проникновении рассеянного поля сквозь септум в сверхпроводящем витке возбуждается круговой ток, в точности компенсирующий изменение магнитного потока через площадь, охватываемую витком. Таким образом, рассеянные поля автоматически компенсируются полем короткозамкнутого витка. В отсутствие потерь энергии после завершения цикла ток, возникающий в идеальном сверхпроводящем короткозамкнутом витке, должен вернуться к нулевому значению. Однако в контуре витка присутствует спай, имеющий некоторое активное сопротивление, меняющееся в зависимости от значения тока, протекающего через спай. Из-за частичной диссипации возбуждаемого тока на сопротивлении спаия после завершения цикла ток витка будет иметь не нулевое, а небольшое отрицательное значение. При повторении циклов поля наблюдается накопление тока, продолжающего протекать в витке в паузе между циклами, что в итоге приводит к ощутимому воздействию на пучок низкой энергии при инжекции в ускоритель.

Для изучения эффекта накопления тока к началу 46-го сеанса был изготовлен, откалиброван и установлен на короткозамкнутом витке датчик постоянного тока, состоящий из двух половин стального цилиндра с внешним диаметром 36 мм и высотой 30 мм, между которыми установлены стеклотекстолитовые пластины, в одной из которых находится углубление для датчика Холла (рис. 2.1). В центре датчика — отверстие для сверхпроводящего кабеля, в котором измеряется величина тока.

Для измерений был выбран датчик Холла НГСТ-3020, работающий при криогенных температурах. Дополнительно устройство было оборудовано датчиком температуры. Калибровка датчика тока была проведена при комнатной температуре при значениях силы тока до 200 А, со стальными полуцилиндрами и без них. Результаты показали, что использование стального магнитопровода позволяет увеличить чувствительность датчика почти в 10 раз. Точка размещения дат-

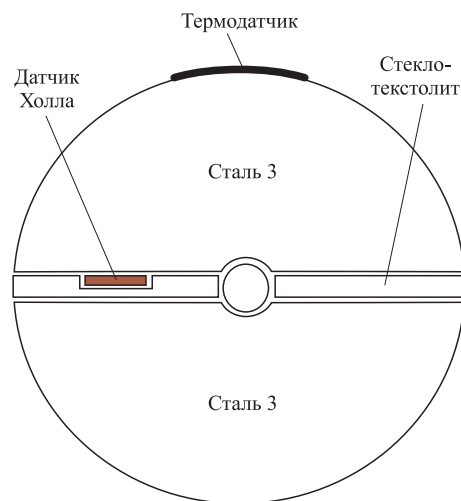


Рис. 2.1. Схема датчика тока

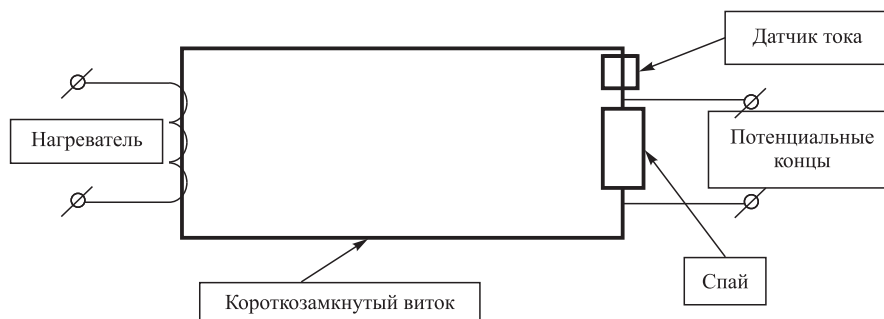


Рис. 2.2. Схема расположения датчика тока на короткозамкнутом витке

Датчик тока на короткозамкнутом витке схематически представлена на рис. 2.2. Для получения дополнительной информации о протекающих процессах потенциальные концы со спая были выведены наружу криостата.

В 46-м сеансе проведена серия измерений, полностью подтвердившая эффект накопления тока. Была оценена величина тока витка при инъекции, начиная с которой происходит заметное снижение эффективности захвата в режим ускорения. Она составляет около 20 А, а время накопления тока зависит от амплитудного значения поля магнитов и временных параметров цикла и может составлять от нескольких часов до нескольких суток.

К 47-му сеансу было подготовлено программное обеспечение для дистанционной калибровки датчика, наблюдения процессов и дистанционного управления током и временем включения источника питания нагревателя. В качестве примера на рис. 2.3 приведены показания датчика Холла при разных параметрах цикла магнитного поля нуклотрона.

Амплитуда тока в витке была измерена в интервале полей дипольных магнитов от 0,1 до примерно 1,7 Тл (рис. 2.4). При малых полях с хорошей точностью соблюдается линейная связь тока витка и поля магнитов, а с поля примерно 1 Тл начинает сказываться насыщение железного септума магнита Ламбертсона. Экстраполяция полученной зависимости показывает, что при поле 2 Тл в витке будет циркулировать ток примерно 2,3 кА, что находится в хорошем соответствии с расчетным значением. Это подтверждает необходимость использования короткозамкнутого витка: если его разомкнуть или перевести в нормально проводящее состояние, то при работе нуклотрона на больших полях можно ожидать серьезных проблем с динамикой пучка. Количественные исследования динамики накопления тока, «замороженного» в паузе между циклами, требует длительного времени, однако полученных результатов достаточно для качественного объяснения наблюдаемых изменений со временем динамики пучка при инъекции.

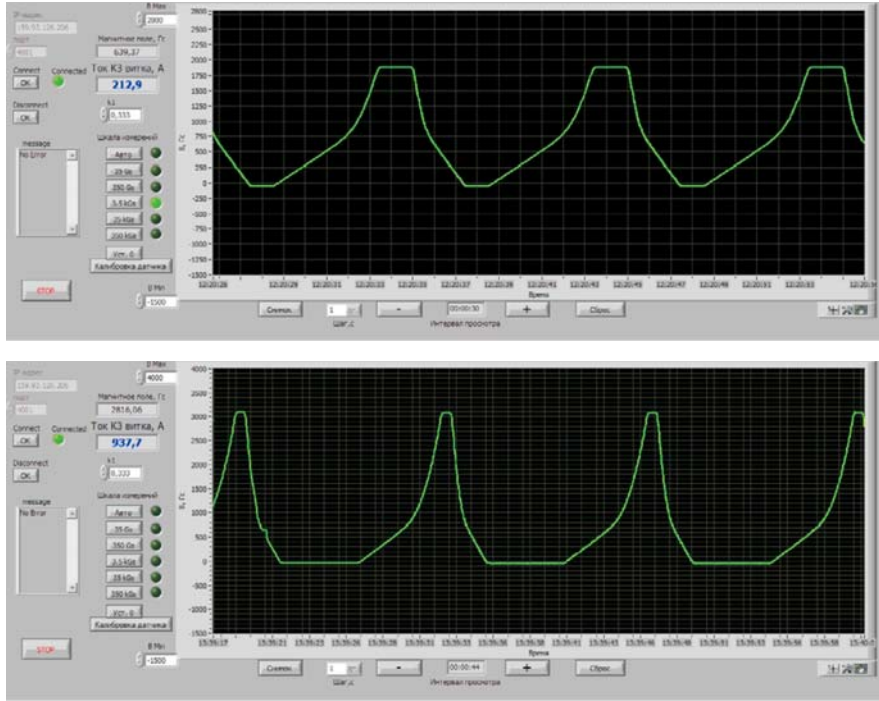


Рис. 2.3. Зависимость магнитного поля, измеряемого датчиком Холла, в короткозамкнутом витке от времени в течение нескольких циклов магнитного поля дипольных магнитов. Верхний рисунок соответствует амплитуде поля магнитов, равной 1,48 Тл, нижний — 1,67 Тл

Уменьшение тока в витке на плоской вершине импульса определяется постоянной времени $\tau = L/R$. Расчетная индуктивность витка при малом уровне поля составляет примерно $L \approx 3,5 \cdot 10^{-6}$ Гн и по мере насыщения железного ядра магнита снижается в пределе в два раза. Сопротивление спая R может лежать в диапазоне от 0,1 до нескольких единиц нОм. Для меньшего из значений в указанном интервале постоянная времени составляет примерно 10 ч. Уменьшение тока витка на «столе» поля приводит к появлению такого же по величине тока противоположного направления в паузе между циклами. Соответственно, время накопления Δt тока витка, циркулирующего в паузе между циклами, до некоторого критического значения $I_{кр}$ зависит от амплитудного значения I_a и по порядку величины может быть оценено как

$$\Delta t = \eta_{\text{н}}^{-1} \eta_{\text{уск}}^{-1} \tau \ln \frac{I_a}{I_a - I_{\text{кр}}}, \quad (2.1)$$

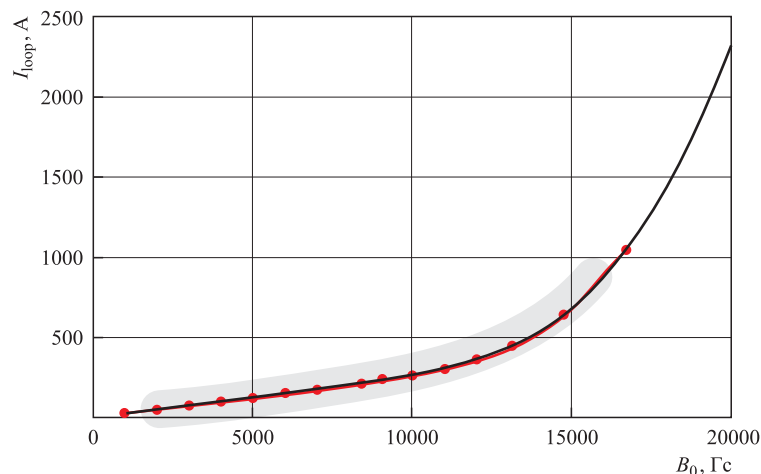


Рис. 2.4. Зависимость амплитудного значения силы тока в КЗ-витке от амплитуды магнитного поля в дипольных магнитах

где $\eta_{ц}$ — отношение длительности «стола» поля к периоду следования циклов, характерное значение которого составляет примерно 0,1; $\eta_{уск}$ — доля времени работы ускорителя от полной продолжительности смены, которая с учетом штатных остановок на дозаливку жидкого азота оптимистично может быть оценена в 80–90 %.

Поле, создаваемое накопленным током короткозамкнутого витка, приводит к трем эффектам: искажению замкнутой орбиты, смещению частот бетатронных колебаний и уменьшению динамической апертуры ускорителя. Численное моделирование динамики частиц при инжекции показали, что для полной гибели пучка при инжекции достаточно тока примерно $I_{кр} \sim 70$ А. При таком значении оценка (2.1) при поле на «столе» 1,5 Тл дает время накопления тока до критического значения примерно 9 ч. Учет реальной формы цикла, зависимости индуктивности витка от поля магнитов и учет диссипации тока витка в паузе между циклами должны привести к увеличению времени накопления при малых значениях поля на «столе» и к сокращению при больших. Однако даже такая грубая оценка выглядит вполне разумно.

В ходе 47-го сеанса была отработана методика обнуления «замороженного» тока путем отогрева витка в паузе между циклами. С использованием дистанционного управления подобраны минимально необходимые параметры питания нагревателя. Так, при токе нагревателя 0,5 А достаточно $\sim 0,6$ с для перевода витка в нормально проводящее состояние. Восстановление сверхпроводящего состояния после выключения нагревателя занимает менее 1 с. Таким образом, паузы между циклами длительностью 1–2 с вполне доста-

точно, чтобы обнулить накопленный ток короткозамкнутого витка. В зависимости от поля на «столе» нагреватель можно включать либо в каждую паузу между циклами, либо с периодом повторения в несколько десятков или сотен циклов.

Использование такой методики позволило в 47-м сеансе стабильно отработать смену с полем на «столе» примерно 1,7 Тл (энергия ускоренных дейтронов 4,8 ГэВ/нуклон). Таким образом, с точки зрения возможности эксплуатации нуклотрона на больших полях проблема, связанная с короткозамкнутым витком в магните Ламбертсона, может считаться решенной. Однако использование магнитов Ламбертсона планируется на нуклотроне в системе ввода пучка из бустера и в системе быстрого (однооборотного) вывода пучка в кольца коллайдера. Поэтому детальные исследования влияния тока витка на динамику частиц с целью экспериментального уточнения всех параметров запланированы в ближайших сеансах нуклотрона.

3. РАЗВИТИЕ СИСТЕМЫ ПИТАНИЯ

В настоящее время вся цепь структурных дипольных магнитов и квадрупольных линз нуклотрона, включенных последовательно, питается от общего основного источника. Положение рабочей точки ускорителя настраивается с помощью двух дополнительных источников разбаланса тока меньшей мощности: один из них уменьшает ток, протекающий в цепи последовательно соединенных фокусирующих и дефокусирующих линз (источник токоотбора), второй увеличивает ток в цепи дефокусирующих линз (источник токодобавки) (рис. 3.1).

Основной источник, созданный на базе двух доработанных управляемых мостовых 6-фазных тиристорных выпрямителей 19ТВ и 20ТВ, был введен в опытную эксплуатацию в ходе 42-го сеанса [1]. Эвакуация энергии из магнитов при срыве сверхпроводимости осуществляется мощными тиристорными ключами КТ1–КТ6. Источники разбаланса тока построены по одинаковому принципу. Основой силовой части являются управляемые 6-фазные тиристорные выпрямители ТВ (реализуемые на базе доработанного источника 37ТВ — для токоотбора, а 42ТВ — для токодобавки), пульсации несущей частоты преобразования 300 Гц которых сглаживаются силовым пассивным R–C-фильтром. Требуемое качество поддержания выходного тока во всем динамическом диапазоне обеспечивается силовым транзисторным регулятором, построенным по модульному принципу. Электронные ключи КЭ1–КЭ4 системы эвакуации энергии, представляющие собой мощные интеллектуальные IGBT-транзисторы, включаются (а вернее, отключаются) и вводят при этом в цепь резисторы гашения поля по команде от системы детектирования срыва сверхпроводимости синхронно с ключами КТ1–КТ6.

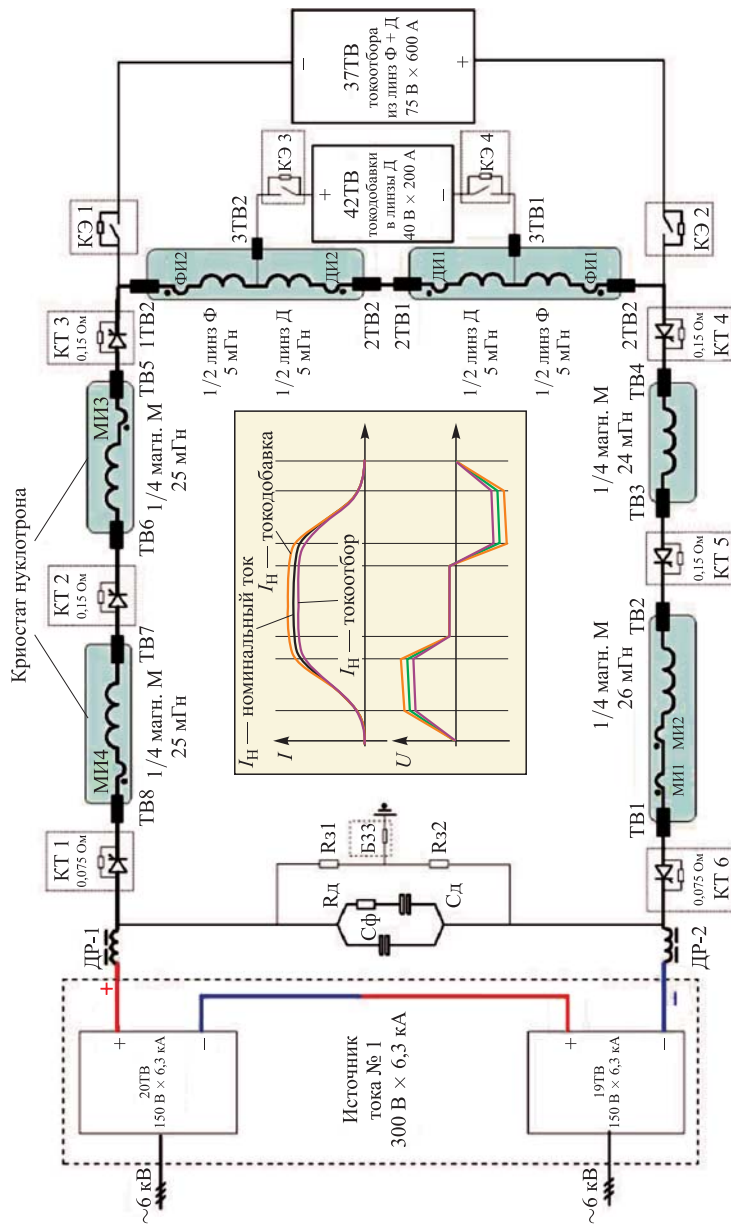


Рис. 3.1. Структурная схема электропитания магнитов и линз нуклотрона. В центре — эпюры тока и напряжения источников питания в течение цикла



Рис. 3.2. Пульсации дипольных (dB/dt — источник 19ТВ + 20ТВ) и квадрупольных полей (dG/dt — источник 37ТВ) на «столе» магнитного поля 15 кГц (45-й сеанс, 20 марта 2012 г.)

Прототип источника токоотбора был испытан в 44-м сеансе, а в 45-м сеансе начат ввод в эксплуатацию транзисторных регуляторов [3]. Требуемую степень стабилизации тока на «столе» медленного вывода в ходе 45-го сеанса не удалось обеспечить (рис. 3.2), что приводило к пульсации во времени тока выведенного пучка.

Снижение пульсаций тока и обеспечение требуемого качества медленного вывода являлось одной из основных «ускорительных» задач 46-го сеанса нуклотрона. Были оптимизированы настройки преобразователя и регулятор тока основного источника 19ТВ + 20ТВ, в результате качественно улучшена стабильность поля дипольных магнитов при минимальных пульсациях



Рис. 3.3. Модуль регулятора тока 50 А × 10 В, пиковая нагрузка до 1,2 кВт



Рис. 3.4. Пульсации дипольных (dB/dt — источник 19ТВ + 20ТВ) и квадрупольных полей (dG/dt — источник 37ТВ) на «столе» магнитного поля 14 кГц (46-й сеанс, 7 декабря 2012 г.). Масштаб по вертикальной оси тот же, что и на рис. 3.2

в рабочем диапазоне — от поля инжекции до конца «стола». Источник тока-отбора 37ТВ был усилен, и введен в работу новый транзисторный регулятор, состоящий из четырех силовых модулей (рис. 3.3).

В ходе сеанса была обеспечена надежная работа с током отбора до 200 А. С 3 декабря была доработана схема источника и получены минимальные пульсации градиента магнитного поля в фокусирующих и дефокусирующих



Рис. 3.5. Тиристорный выпрямитель 37ТВ и регулятор тока 80 В × 300 А (машинный зал корп. 1А, март 2013 г.)

линзах в рабочем диапазоне от поля инжекции до конца «стола». В результате пульсации полей на «столе» были снижены примерно в 20 раз по сравнению с 45-м сеансом (рис. 3.4).

К началу 47-го сеанса силовая цепь 37ТВ была доработана: подключены IGBT, оптимизирован R–C-фильтр, проверена изоляция силовых трасс. Разработаны и изготовлены схемы управления и защит, сопряженные с заводской электроникой 37ТВ, внешней управляющей циклозадающей аппаратурой и источниками 19ТВ, 20ТВ. В ходе сеанса источник 37ТВ был введен в работу в новой конфигурации с параметрами 80 В × 300 А (рис. 3.5).

В 47-м сеансе был испытан прототип источника токодобавки (рис. 3.6). Для этого к началу сеанса была доработана силовая цепь 42ТВ: подключены IGBT, оптимизирован R–C-фильтр, проложены силовые кабели. Разработаны и изготовлены в макетном варианте схемы управления и защит, сопряженные с внешней управляющей циклозадающей аппаратурой и источниками 19ТВ, 20ТВ. Ввод источника в работу намечен на 48-й сеанс.

В ближайших сеансах планируется ускорение на нуклотроне тяжелых ионов, поэтому обеспечение ускорения пучка при максимально достижимом темпе роста поля является одной из приоритетных задач. Работа с максимальным темпом роста поля также будет необходима при выполнении

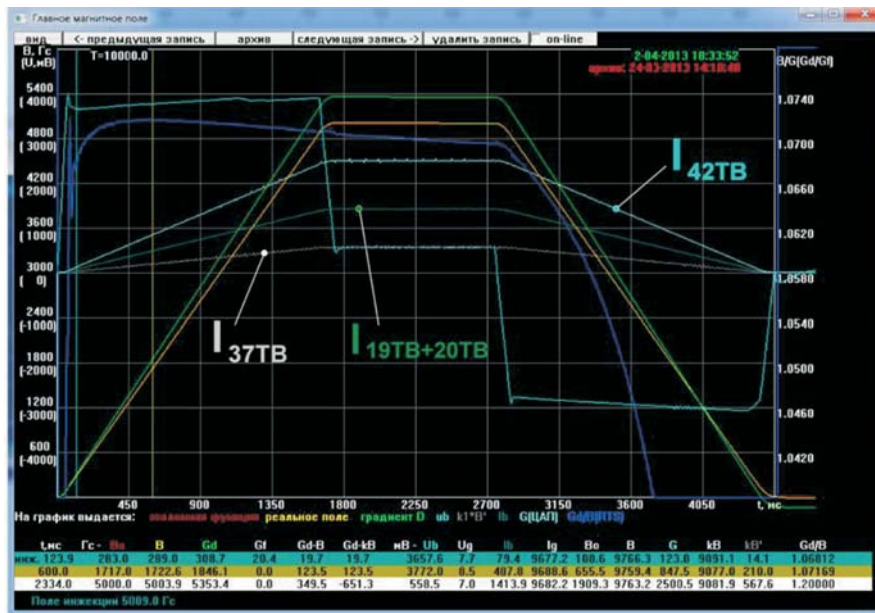


Рис. 3.6. Цикл с токоотбором из фокусирующих и дефокусирующих линз — источник 37ТВ и токодобавкой в дефокусирующие линзы — источник 42ТВ (24 марта 2013 г.)

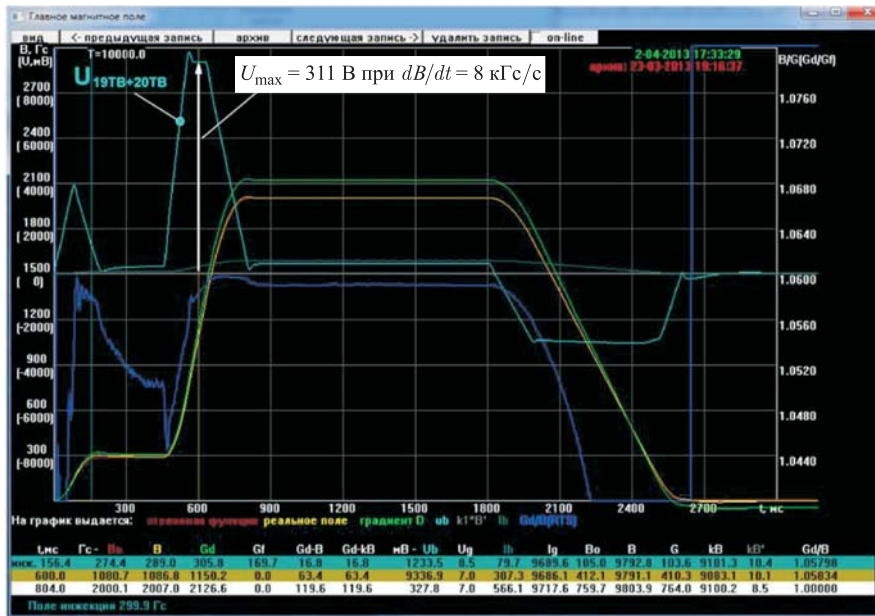


Рис. 3.7. Диаграмма цикла с темпом роста поля 0,8 Тл/с

эксперимента VM@N для обеспечения требуемой сважности вывода пучка. Поэтому в 47-м сеансе продолжалась оптимизация совместной работы источников 19ТВ + 20ТВ и 37ТВ в режимах с ростом поля от 0,3 Тл/с до максимально достижимого. В результате была обеспечена работа системы питания при циклах с производной 0,8 Тл/с (рис. 3.7) и с использованием адиабатического захвата на «столе» инжекции была продемонстрирована возможность ускорения пучка с таким ростом поля.

На настоящий момент возможный темп роста поля в дипольных магнитах нуклотрона ограничен сверху величиной 0,8 Тл/с, при которой максимальное напряжение источника 19ТВ + 20ТВ достигает 311 В. При попытке получить больший темп источник входит в насыщение, что приводит к потере управляемости.

Кроме того, в рамках подготовки к штатной работе на максимальном проектном токе для повышения надежности работы системы защиты в пультовой корп. 1А к началу 47-го сеанса был испытан, а в ходе сеанса введен в опытную эксплуатацию канал мониторингования состояния ключей эвакуации энергии КТ1–КТ6 (рис. 3.8).

Для тестирования состояния элементов магнитной системы нуклотрона на максимальном токе питания была разработана методика, позволяющая за счет

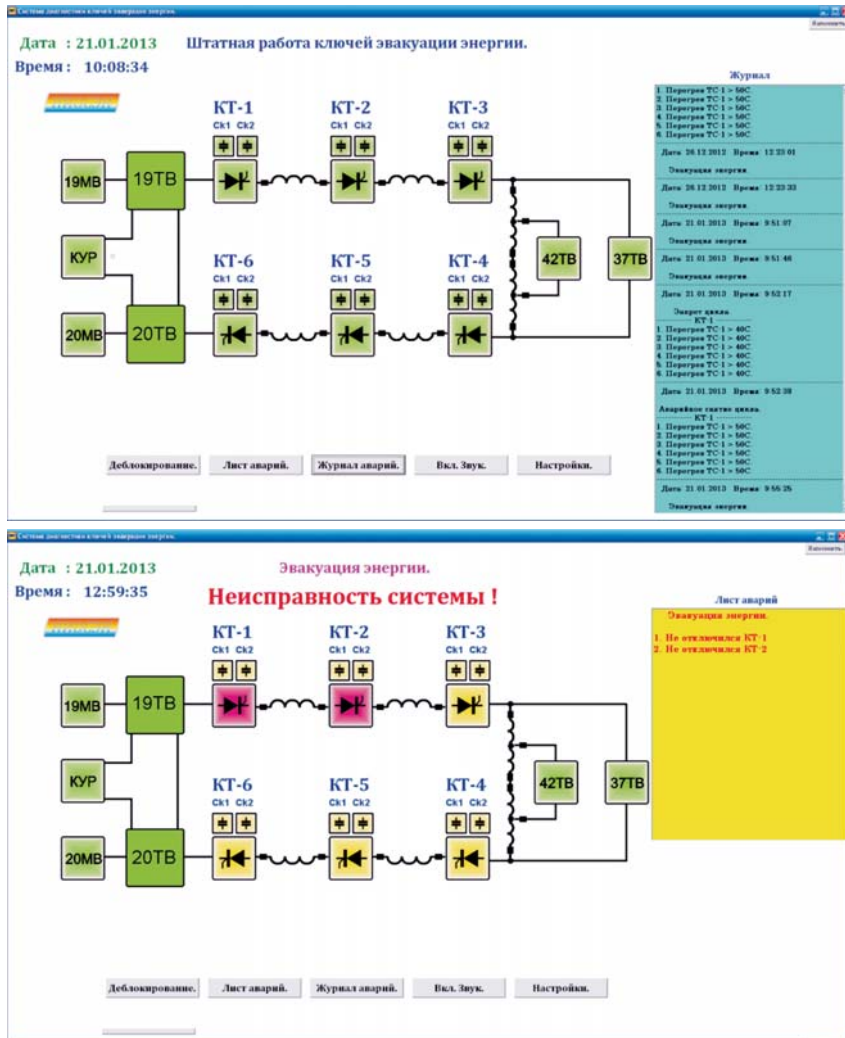


Рис. 3.8. Пример отображения состояния ключей эвакуации энергии в новой системе мониторинга. Верхнее окно — штатный режим работы ключей эвакуации, нижнее — сбой процесса эвакуации энергии в КТ1, КТ2 (проверка системы, январь 2013 г.)

использования шинных коммутаторов и трансферных шин независимо питать отдельные сектора магнитной системы. Для примера на рис. 3.9 приведена схема коммутации при питании дипольных магнитов 7-го и 8-го октантов.

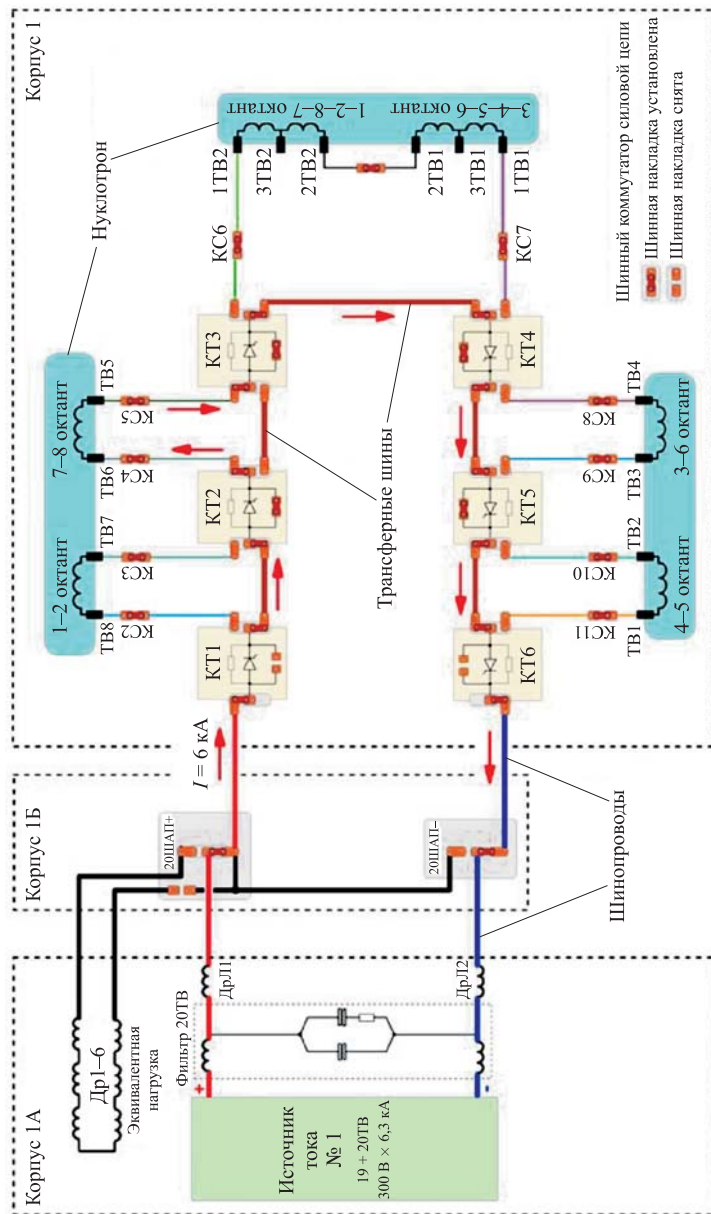


Рис. 3.9. Схема электропитания магнитов и линз нуклотрона при тестировании состояния магнитной системы по секторам

Необходимые технические мероприятия для реализации этой методики осуществлены в рамках подготовки к 48-му сеансу, и в ближайшие сеансы планируется ее тестирование и использование.

4. ИССЛЕДОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИЯ ДИНАМИКИ ЧАСТИЦ

4.1. Улучшение качества медленного вывода. Радикальное снижение пульсаций магнитного поля на «столе», достигнутое при развитии системы электропитания нуклотрона, позволило, начиная с 46-го сеанса, обеспечить качество растяжки пучка при медленном выводе, соответствующее проектным требованиям. На рис. 4.1 и 4.2 приведены временные зависимости интенсивности выведенного пучка, полученные в 46-м и 47-м сеансах. Энергия дейтронов при этих измерениях составляла примерно 1 ГэВ/нуклон.

Основной количественной характеристикой растяжки пучка при медленном выводе является коэффициент постоянного тока K_{dc} , определяемый как

$$K_{dc} = \left(\int_{t_1}^{t_2} \frac{dN}{dt} dt \right)^2 / \left((t_2 - t_1) \int_{t_1}^{t_2} \left(\frac{dN}{dt} \right)^2 dt \right),$$

где t_1 , t_2 — время начала и окончания вывода. Для обоих приведенных примеров K_{dc} составляет примерно 96 %, что соответствует лучшим показателям, достигнутым в мировой практике.

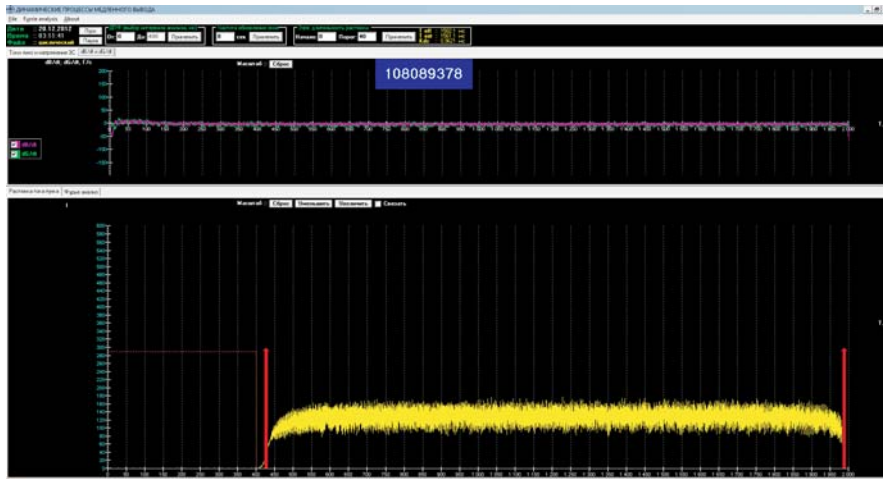


Рис. 4.1. Сеанс 46. Длительность растяжки 1600 мс

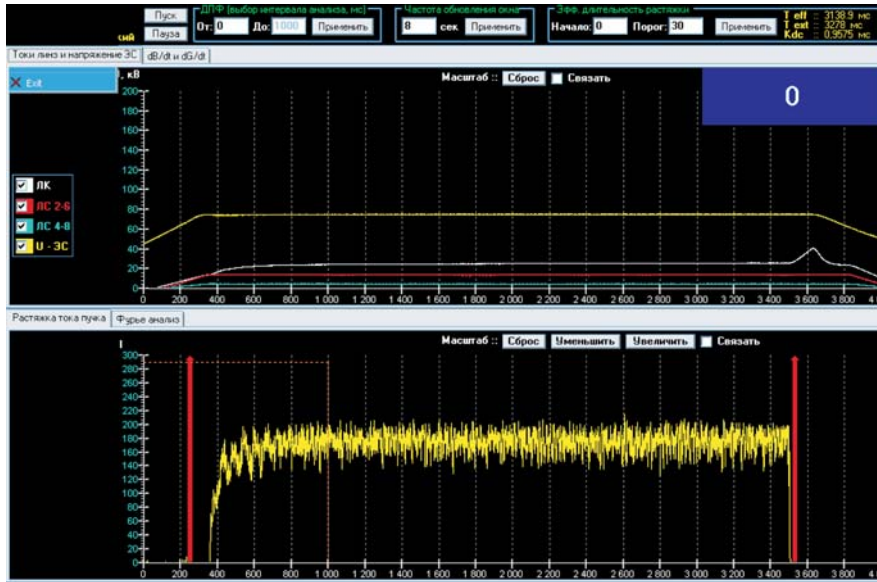


Рис. 4.2. Сеанс 47, длительность растяжки 3 с

Однако эти результаты требуют существенного комментария. Достижение рекордно малого уровня пульсаций полей само по себе еще не обеспечивает высокого качества растяжки пучка при выводе. Оно необходимо для устойчивой работы системы обратной связи, которая регулирует ток квадрупольных линз медленного вывода и осуществляет наводку рабочей точки на резонанс. Для настройки системы обратной связи требуется «хороший» сигнал от выведенного пучка. В приведенных примерах темп вывода по заявке физиков, проводящих экспериментальные исследования на пучке, был снижен до величины примерно 10^8 частиц в секунду за счет искусственного уменьшения интенсивности ускоренного пучка. При дальнейшем снижении интенсивности качество растяжки неизбежно будет ухудшаться.

Максимальная энергия, на которой можно обеспечить качественный медленный вывод, в настоящее время ограничена возможностями источников питания разбаланса и линз раскачки, а также состоянием электростатического септума. В ходе 47-го сеанса медленный вывод с высокой эффективностью и с коэффициентом постоянного тока 80–90 % был обеспечен вплоть до энергии 4 ГэВ/нуклон. Для обеспечения стабильной работы системы обратной связи на больших полях требуется уموжнение источника питания резонансных квадрупольных линз медленного вывода. В ходе 47-го сеанса проведены испытания нового источника 260-PS-70D, изготовленного EVPU a.s. (Слова-

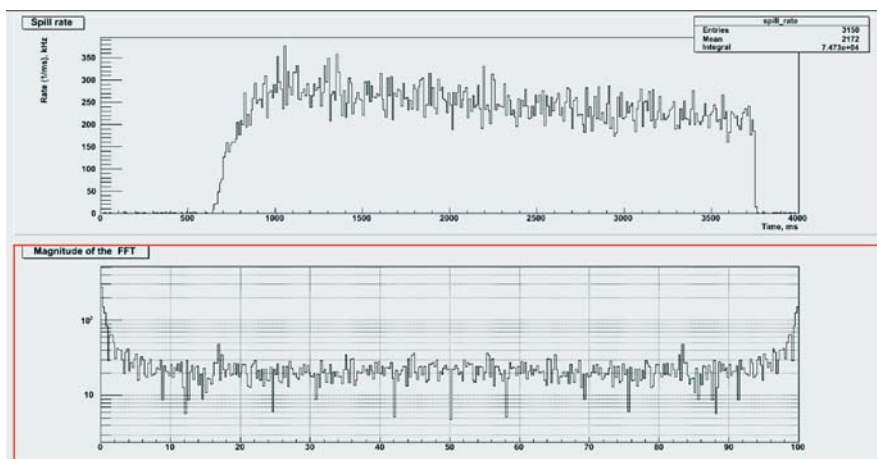


Рис. 4.3. Зависимость темпа счета от времени на установке «Стрела» в течение медленного вывода (верхний график) и разложение в ряд Фурье — нижний график (47-й сеанс)

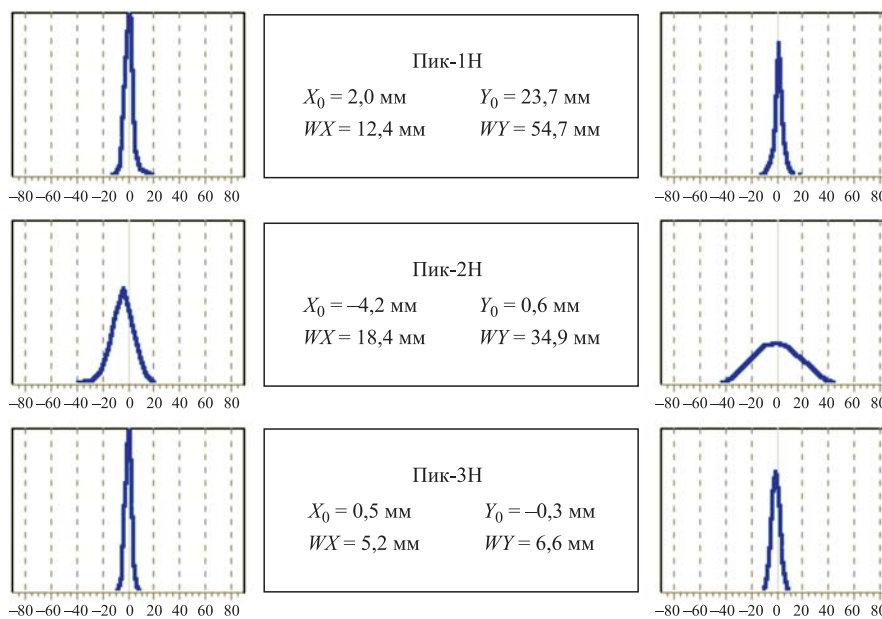


Рис. 4.4. Профили пучка в канале медленного вывода

кия). Для этого к началу сеанса были подготовлены силовые схемы, схемы защит от срыва сверхпроводимости и управления. В ближайшем сеансе планируется продолжить работы по вводу источника в эксплуатацию.

В 47-м сеансе появилась возможность настройки медленного вывода по темпу счета детектирующей аппаратуры на физических установках. Так, например, в пультовую нуклотрона был выведен сигнал с установки «Стрела» (рис. 4.3).

Качество пучка, получаемого физиками, определяется не только системой медленного вывода нуклотрона. Оно также зависит от качества настройки элементов оптики каналов транспортировки в корп. 205. Пример одного из лучших вариантов настройки, полученных в ходе 47-го сеанса, приведен на рис. 4.4.

Профиль выведенного пучка имеет форму, близкую к гауссовой, горизонтальный и вертикальный эмиттансы равны соответственно $\varepsilon_x \approx 11\pi$ мм · мрад и $\varepsilon_z \approx 17\pi$ мм · мрад. Как уже отмечалось ранее [4, 5], для обеспечения высокого качества выведенного пучка в штатном режиме, для эффективного проведения физических экспериментов на выведенном пучке, критичных к его параметрам, требуется существенная модернизация системы питания каналов транспортировки выведенных пучков.

4.2. Коррекция замкнутой орбиты методом разложения матрицы отклика по сингулярным числам. В ходе 46-го сеанса был впервые реализован метод коррекции равновесной орбиты пучка, основанный на разложении матрицы отклика по сингулярным числам (SVD — singular value decomposition).

Суть метода заключается в следующем. Предварительно токи корректирующих дипольных магнитов (корректоров) выставляются при проводке первого оборота пучка от одного пикап-электрода к другому до замыкания орбиты. При циркуляции пучка координаты замкнутой орбиты в точках расположения пикап-электродов измеряются цифровой системой «Орбита». Затем измеряются искажения орбиты, вызванные малым изменением тока одного из корректоров. Последовательно изменяется ток в каждом из корректоров и заполняется матрица отклика замкнутой орбиты размерностью $n_k \times n_p$, n_k — количество корректоров, которое для нуклотрона равно 40, n_p — количество пикап-электродов, равное 46 (горизонтальных и вертикальных). У полученной матрицы определяются сингулярные числа, из них выбираются 3–5, имеющих максимальные значения по абсолютной величине. С помощью полученных сингулярных чисел рассчитывается псевдообратная матрица к матрице отклика, умножение которой на вектор координат орбиты дает необходимое изменение токов в корректорах.

Один шаг коррекции требует примерно 4–5 ч времени работы с пучком. Это определяется тем, что положение орбиты при одном наборе токов корректоров измеряется последовательно в течение 5–10 циклов ускорения.

Недостовверные измерения исключаются по показателю отношения сигнала к шуму, вычисляется среднее положение орбиты и среднеквадратичный разброс. Кроме того, для определения степени линейности отклика измерения проводятся при добавке и при уменьшении тока корректоров.

В 46-м сеансе эта процедура получения и обработки результатов измерения матрицы отклика была проделана в ручном режиме. К 47-му сеансу было подготовлено программное обеспечение для частичной автоматизации процесса, при этом изменение токов корректоров по-прежнему проводилось вручную.

Пример результата работы алгоритма приведен на рис. 4.5: размах искажения орбиты по показаниям пикап-электродов до коррекции составлял от -15 до $+10$ мм, после коррекции — от -10 до $+5$ мм. При этом получено хорошее совпадение теоретически предсказанной и измеренной орбит после коррекции. Для улучшения результатов необходимо проделать несколько последовательных итераций.

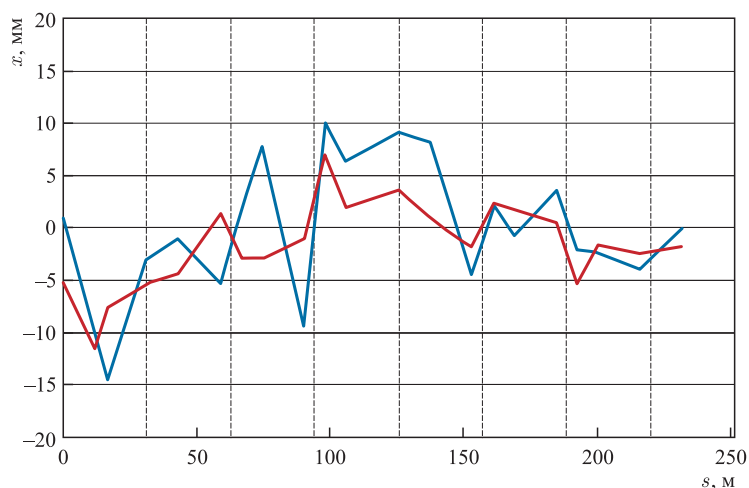


Рис. 4.5. Горизонтальная орбита по показаниям пикап-электродов: до коррекции — синяя кривая, после коррекции — красная

В связи с наличием нециклирующих магнитных элементов в кольце нуклотрона наблюдается изменение положения орбиты на начальной стадии цикла магнитного поля (примерно до 500 Гс). Для стабилизации положения орбиты процедуру коррекции необходимо повторить при нескольких значениях магнитного поля. В результате должны быть получены зависимости значения тока каждого из корректоров от величины поля дипольных магнитов. В настоящее время основной процедурой, определяющей продолжительность

коррекции, является установка и проверка правильности «отработанных» токов в корректорах. К ближайшим сеансам планируется автоматизация этого процесса и проведение полного цикла коррекции орбиты в штатной рабочей точке нуклотрона.

4.3. Исследования динамики продольного движения. В сооружаемом бустере комплекса NICA планируется инжекция пучка на «стол» поля с последующим адиабатическим захватом в режим ускорения, затем адиабатическая дебанчировка пучка на промежуточном «столе», электронное охлаждение и повторный адиабатический захват. Эти режимы требуют сложных манипуляций с амплитудой ускоряющего напряжения и изменением режимов привязки частоты к магнитному полю. Для экспериментального определения технических требований к точности поддержания амплитуды и частоты в 46-м и 47-м сеансах проводились исследования динамики продольного движения частиц на нуклотроне в аналогичных режимах. Кроме того, реализация адиабатического захвата на нуклотроне способна обеспечить более высокий коэффициент захвата и ускорение при большем темпе роста поля. Адиабатическая дебанчировка и последующая повторная группировка на промежуточном «столе» необходима на нуклотроне для реализации работы в режиме с двумя пользователями. При этом на промежуточном «столе» проводится эксперимент на внутренней мишени, а неиспользованная часть пучка ускоряется до большей энергии и выводится для экспериментов с фиксированной мишенью. Манипуляции с амплитудой ускоряющего напряжения на «столе» поля также позволяют регулировать разброс по импульсу в ускоренном пучке после выключения высокочастотной системы, что полезно при оптимизации медленного вывода и при экспериментах по стохастическому охлаждению.

4.3.1. Адиабатический захват при инжекции. В настоящее время в нуклотроне инжекция осуществляется при растущем поле дипольных магнитов. При этом модуль синхронной фазы связан с амплитудой ускоряющего напряжения V и темпом роста поля dB/dt известным соотношением

$$T_{tr}V \cos \varphi_s = CR \frac{dB}{dt},$$

где C — периметр синхротрона; R — радиус поворота в магнитах; T_{tr} — фактор пролетного времени, зависящий от конструкции ускоряющего промежутка. Для нуклотрона $C \approx 251$ м, $R \approx 22$ м, $T_{tr} \approx 0,65$.

При отсутствии ограничений на максимальное отклонение частиц по импульсу и при идеальном согласовании частоты ускоряющего напряжения с величиной магнитного поля коэффициент захвата может быть оценен как отношение фазовой протяженности сепаратриссы Φ к 2π . Фазовая протяженность Φ связана с синхронной фазой равенством

$$\operatorname{tg} \varphi_s = \frac{\Phi - \sin \Phi}{1 - \cos \Phi}.$$

Максимальная амплитуда ускоряющего напряжения, которая в настоящее время может быть получена с помощью двух ускоряющих станций нуклотрона, составляет примерно 16 кВ. Как правило, стабильная работа соответствует напряжению 7 кВ на каждой из станций. В качестве иллюстрации на рис. 4.6 приведена верхняя оценка коэффициента захвата в нуклотроне в зависимости от темпа роста поля при амплитуде ускоряющего напряжения 14 кВ.

При инъекции в растущее поле частицы пучка «размазываются» по всей сепаратрисе и разброс по импульсу становится равен вертикальному размаху сепаратриссы. При этом, если вертикальный размах сепаратриссы меньше, чем аксептанс ускорителя по относительному отклонению по импульсу, то часть частиц теряется при захвате на апертуре. Так, в статье [6] было показано, что при аксептансе на уровне $\pm 4 \cdot 10^{-3}$ максимальный коэффициент захвата составляет примерно 60%. Аксептанс определяется максимальным значением дисперсионной функции и качеством настройки орбиты. При хорошей настройке орбиты циркуляция пучка при индексии (без ускорения) наблюдается в интервале полей примерно ± 2 Гс при поле инъекции примерно 293 Гс. Это соответствует продольному аксептансу примерно $\pm 6 \cdot 10^{-3}$. При малых темпах роста поля коэффициент захвата может достигать примерно 75%. Так, например, в 42-м сеансе после тщательной коррекции орбиты при темпе роста поля 0,3 Тл/с была получена рекордная интенсивность ускоренного пучка около $5 \cdot 10^{10}$ [1]. Заметного увеличения продольного аксептанса нуклотрона можно ожидать при переходе в штатную рабочую точку, где дисперсионная функция примерно в два раза меньше, чем при настройке, используемой в настоящее время. Таким образом, при ускорении полностью ободранных легких ионов (например, дейтронов) большого выигрыша по интенсивности при реализации адиабатического захвата можно не ожидать.

Ситуация радикально меняется при ускорении тяжелых ионов с малой интенсивностью пучка из источника, когда необходимо одновременно обеспечить максимально достижимый темп роста поля (чтобы уменьшить потери ионов в процессе ускорения из-за взаимодействия с остаточным газом) и максимальный коэффициент захвата.

Теоретически эффективность адиабатического захвата может быть близка к 100%, при этом процесс требует 10–20 мс, что не приводит к значитель-

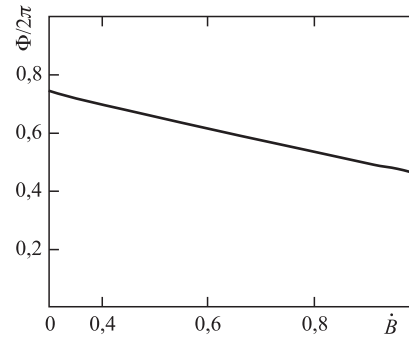


Рис. 4.6. Зависимость фазовой протяженности сепаратрисы в единицах 2π от темпа роста поля в Тл/с. Амплитуда ускоряющего напряжения 14 кВ

ным дополнительным потерям. При этом амплитуды ускоряющего напряжения, устойчиво достигаемой в настоящее время, вполне достаточно, чтобы ускорять пучок с темпом роста поля 1 Тл/с и даже выше.

Исследования по адиабатическому захвату проводились в 47-м сеансе в течение примерно одной ускорительной смены параллельно с работами на источниках питания по повышению темпа роста поля. Был получен устойчивый захват пучка в режим ускорения, интенсивность на «столе» амплитудой 0,2 Тл составила до $3,5 \cdot 10^{10}$ при интенсивности непосредственно после инъекции примерно $5-6 \cdot 10^{10}$ ионов. В дальнейшем без изменения режимов работы ускоряющих станций темп роста поля изменялся от 0,3 до 0,8 Тл/с (максимальная величина, которую обеспечивает система электропитания магнитов). При этом коэффициент захвата незначительно уменьшался из-за изменения производной поля на участке перехода со «стола» в растущее поле (рис. 4.7).

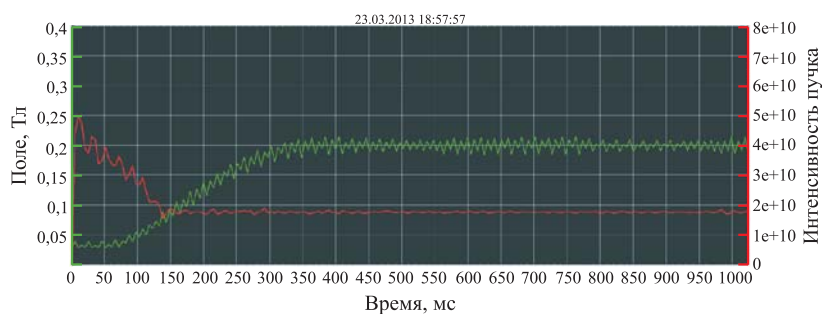


Рис. 4.7. Ускорение с темпом роста поля 0,8 Тл/с, интенсивность ускоренного пучка около $2 \cdot 10^{10}$ ионов. Красная кривая — интенсивность пучка, зеленая — величина магнитного поля (47-й сеанс)

В ближайших сеансах режим с адиабатическим захватом на «столе» планируется использовать в качестве штатного для экспериментов, требующих максимальной интенсивности, и при ускорении тяжелых ионов.

4.3.2. Перезахват на промежуточном «столе» поля. Эксперименты проводились в ходе 46-го сеанса. Инъекция пучка проводилась, как обычно, в растущее поле. Затем пучок ускорялся до «стола» 0,15 Тл, длительность которого составляла 1 с, и затем снова ускорялся до 0,3 Тл. Без выключения ускоряющих станций на первом «столе» переход в растущее поле происходил с незначительными потерями частиц (рис. 4.8). Ранее подобный режим удавалось реализовать практически без потерь, что требует более тщательной настройки закона связи частоты ускоряющего напряжения с магнитным полем.

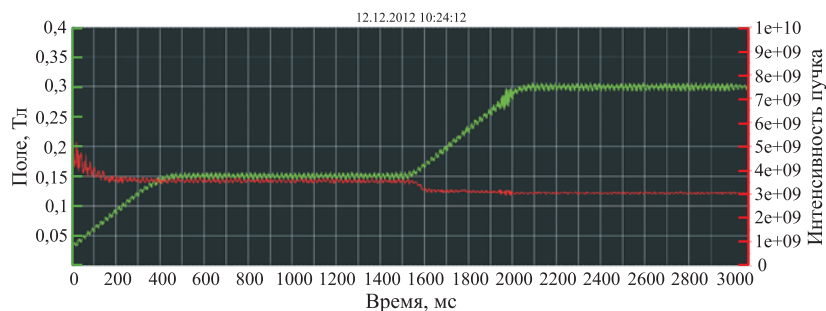


Рис. 4.8. Режим работы с двумя «столами» магнитного поля. Ускоряющее напряжение на первом «столе» не выключается (46-й сеанс)

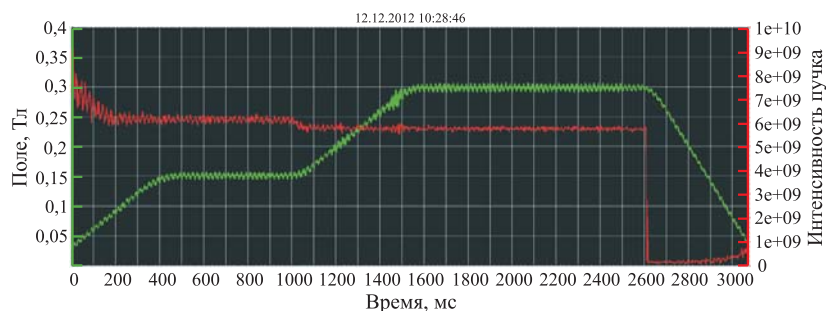


Рис. 4.9. Режим работы с двумя «столами» магнитного поля. Ускоряющее напряжение на первом «столе» выключается на 100 мс (46-й сеанс)

На рис. 4.9 приведены зависимости интенсивности и магнитного поля от времени в аналогичном режиме работы ускорителя. Однако здесь после выхода на первый «стол» амплитуда ускоряющего напряжения в течение 200 мс линейно снижается до нуля, в течение 100 мс имеет нулевое значение, а затем увеличивается в соответствии с квазиadiaбатическим законом на «столе» и линейно при переходе в растущее поле. Видно, что потери в этом случае даже меньше, чем при постоянно включенном ускоряющем напряжении.

Максимальная длительность циркуляции пучка на промежуточном «столе» в 46-м сеансе была ограничена 100 мс из-за технических особенностей системы управления ускоряющими станциями. В ближайших сеансах планируется реализовать режим с распущенным пучком на промежуточном «столе» длительностью, необходимой для проведения экспериментов на внутренней мишени.

5. РАЗВИТИЕ СРЕДСТВ ДИАГНОСТИКИ

5.1. Измерение интенсивности пучка и мониторинг потерь.

К началу 46-го сеанса в канале инжекции в нуклотрон был установлен быстрый трансформатор тока (FCT — fast current transformer), идентичный используемому на кольце FCT в теплом промежутке. В ходе сеанса он был введен в эксплуатацию и была проведена перекрестная калибровка датчиков интенсивности по всему тракту проводки пучка, включающих в себя

- цилиндры Фарадея в канале инжекции;
- FCT в канале инжекции;
- пикап-электроды на кольце нуклотрона;
- FCT и DCT (direct current transformer) в нуклотроне.

В результате относительная погрешность измерений различными датчиками была сведена примерно до 10 % и появилась возможность абсолютных измерений потерь частиц на всех фазах цикла ускорения. В качестве примера на рис. 5.1 приведены результаты измерений интенсивности с помощью двух FCT, а в правом нижнем углу — фрагмент окна управления, в котором показаны отношения токов пучка в канале инжекции через $3/4$ оборота и через 80 мс ускорения.

Для определения точек локализации потерь начато создание системы мониторинга потерь на основе регистрации нейтронного излучения с помощью блоков БДКН-96 (рис. 5.2), представляющих собой He-3-пропорциональный счетчик в полиэтиленовом замедлителе. Диапазон измерения плотности потока нейтронов этого датчика $0,1-10^4 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Напряжение питания

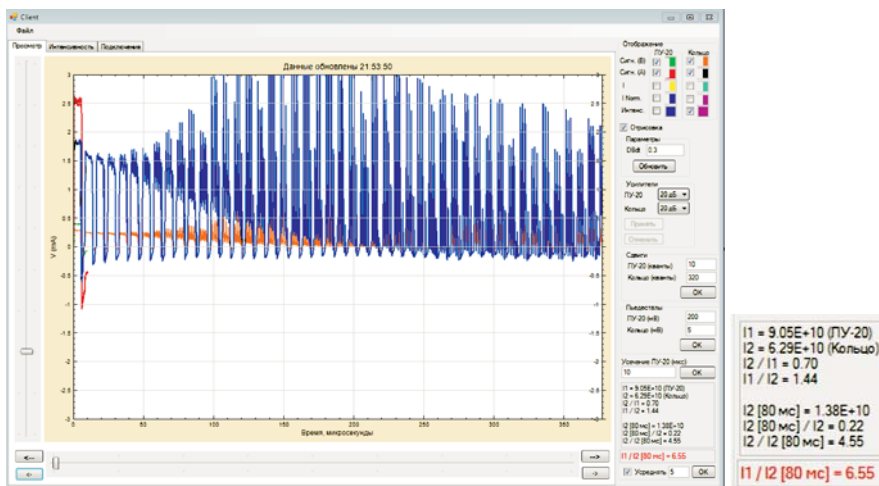


Рис. 5.1. Окно управления быстрыми трансформаторами тока



Рис. 5.2. Внешний вид блока детектирования нейтронов БДКН-96

составляет +7 В, высоковольтный источник питания и формирователь выходных импульсов располагается внутри, при этом масса всего 2 кг.

Благодаря компактности и удобству обслуживания эти блоки предполагается использовать и для системы мониторинга потерь бустера. Для исследования возможностей этих блоков к началу 46-го сеанса два блока были установлены в туннеле нуклотрона, один из них — в окрестности медленного вывода. На рис. 5.3 приведен результат измерений в течение цикла ускорения

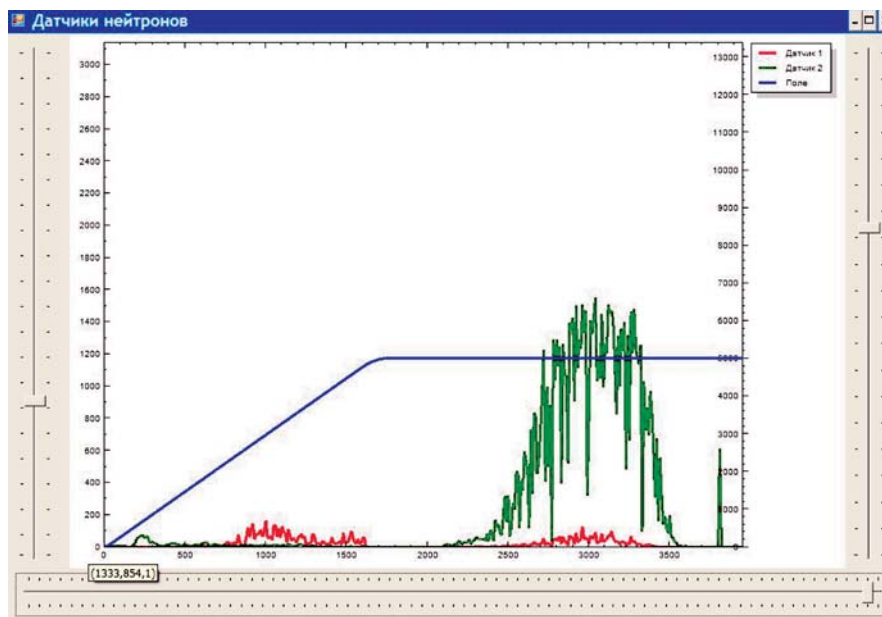


Рис. 5.3. Показания датчиков потерь в цикле ускорения

и медленного вывода пучка. Синяя кривая — зависимость магнитного поля от времени, красная и зеленая — показания датчиков. Отчетливо видны небольшие потери частиц в ходе ускорения пучка, которые другими средствами диагностики не фиксируются.

5.2. Система детектирования переходов в нормально проводящую фазу.

В рамках проекта «Нуклотрон-М» была начата работа по созданию новой системы датчиков перехода, основанной на современных технических и конструктивных решениях, подразумевающих изменение всей концепции ее построения. Первые 20 датчиков были введены в опытную эксплуатацию в 44-м сеансе. Конструкция датчиков описана в [2, 3]. По результатам работы в 44-м и 45-м сеансах было принято решение об изготовлении и установке на нуклотроне полного комплекта датчиков. В 46-м сеансе новая система была принята в опытную эксплуатацию. В 47-м сеансе испытана тестовая версия системы управления датчиками перехода. Система управления (рис. 5.4) предназначена для сбора информации с датчиков перехода и формирования пакета выходной информации о происходящих в системе событиях. Она позволяет принимать входные управляющие сигналы (начало цикла, пауза, срабатывание ТК и т. п.), формировать сигналы управления внешними устройствами, индицировать локально и удаленно текущее состояние, выводить в локальную сеть информацию о состоянии защит и записанные диаграммы перехода, формировать тестовые сигналы для проверки системы ДП (контроль



Рис. 5.4. Блок-схема системы управления

в паузу, контроль питания, контроль целостности выходных цепей) и принимать решение о запрете цикла при неисправностях.

Новая система управления предоставила возможность эффективно выявлять ложные срабатывания и оперативно устранять их причины. Это позволило, например, обеспечить стабильную работу магнитной системы в режимах длительной, до 1000 с, циркуляции пучка на «столе» поля и провести успешный эксперимент по стохастическому охлаждению пучка дейтронов. Кроме того, в ходе 47-го сеанса была набрана большая статистика переходов при полях дипольных магнитов до 1,9 Тл и длительности «столов» до 10 с, что позволило выявить «слабые» места и подготовить ускоритель к стабильной работе при проектной величине поля.

На рис. 5.5 и 5.6 приведен пример сигнала датчика при развитии в обмотке контролируемого элемента нормально проводящей фазы. На рис. 5.5 показано развитие разогрева спая на прямолинейном участке токовода активной фазы в процессе протекания тока через ускоритель. До момента 330 мс (точка 3300 на графике) сохранялась минимальная проводимость, а с этого момента начался разогрев спая. Напряжение разбаланса плавно нарастало в течение примерно 450 мс до точки 780 мс. В этот момент напряжение достигло порога срабатывания и была включена система эвакуации энергии (скачок на графике в точке 7800–8000). Зафиксированный процесс довольно медленный, так как протекающий ток мал (около 600 А).

На рис. 5.6 показано развитие активной фазы в магнитном элементе. В момент времени ~ 765 мс (7650 по шкале графика) произошла потеря сверхпроводимости в точке магнита, появился разбаланс, который достиг по-

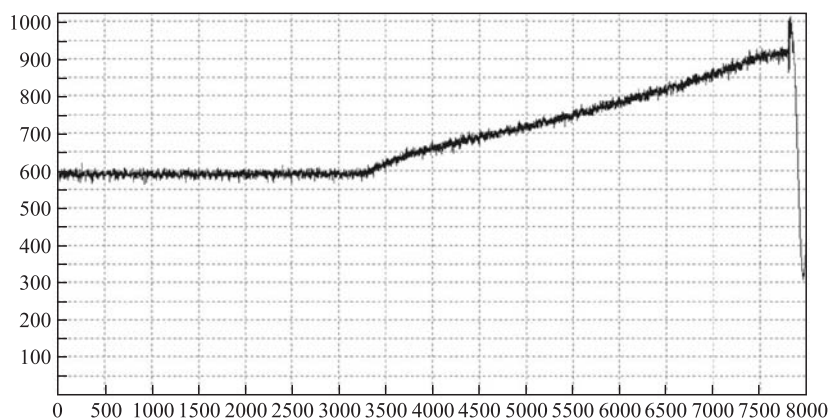


Рис. 5.5. Сигнал датчика при разогреве спая. Вертикальная ось — цифровой отсчет измерительного АЦП — 1023 max, или 3,3 В; горизонтальная ось — время в сотнях мкс, т. е. вся шкала 800 мс

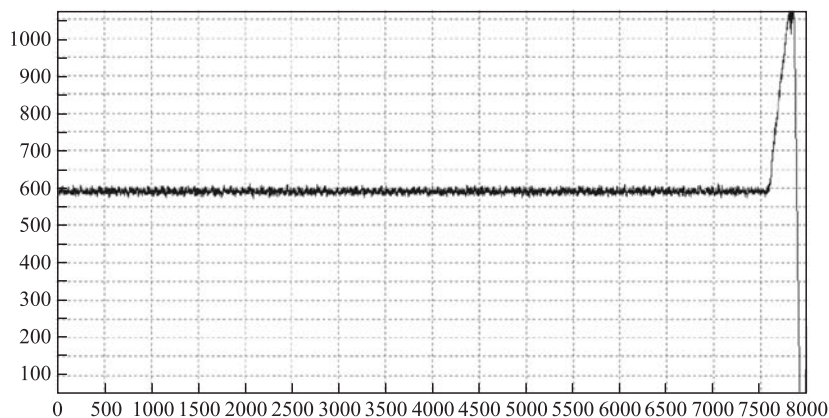


Рис. 5.6. Сигнал датчика при переходе обмотки магнита в нормально проводящую фазу. Вертикальная ось — цифровой отсчет измерительного АЦП — 1023 max, или 3,3 В; горизонтальная ось — время в сотнях мкс, т. е. вся шкала 800 мс

рога срабатывания примерно через 20 мс. В точке ~ 780 (7800 по графику) началась эвакуация энергии.

5.3. Испытание измерителя фазы пучка. В состав изготавливаемой в ИЯФ им. Г. И. Будкера (Новосибирск) высокочастотной системы бустера комплекса NICA входит устройство измерения фазы сгустков относительно фазы ускоряющего напряжения, являющееся основой системы обратной связи для подавления колебаний сгустков в процессе ускорения. Диапазон изменения частот в цикле ускорения и номер гармоники ускоряющего напряжения в нуклотроне и в бустере совпадают (табл. 5.1). Поэтому было решено предварительно испытать измеритель фазы в ходе сеанса нуклотрона.

Принцип работы устройства следующий (рис. 5.7). Сигнал быстрого трансформатора тока и сигнал высокоомного делителя с ускоряющего зазора

Таблица 5.1. Основные параметры измерителя фазы пучка (ИФП) бустера

Диапазон амплитуды сигнала пучка на входе $U_{вх}$	50 мкВ – 10 мВ
Диапазон изменения частоты в цикле ускорения пучка, МГц	0,5–6
Точность измерения фазы пучка, средней для всех сгустков: $U_{вх} > 200$ мкВ 50 мкВ $< U_{вх} < 200$ мкВ	Лучше 1° Лучше 2°
Точность измерения фазы отдельных сгустков пучка при $U_{вх} > 200$ мкВ и кратности гармоники ВЧ, равной 5	Лучше 4°
Минимальное время измерения фазы, мкс	~ 17
Максимальная частота передачи результата в ВЧ-систему, кГц	~ 60

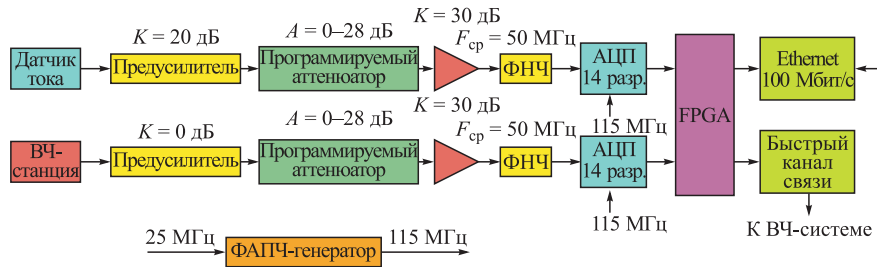


Рис. 5.7. Функциональная схема ИФП

ВЧ-станции после предварительного усиления кабелями одинаковой электрической длины передаются на вход блока измерителя фазы, где они усиливаются, оцифровываются 14-разрядным АЦП. Из сигнала делителя формируются опорные сигналы, на основе которых вычисляются фазы отдельных сгустков и средняя фаза всех сгустков.

Сигнал пучка, сигнал ВЧ-напряжения, сигналы фаз отдельных сгустков и средней фазы всех сгустков мультиплексором данных через Ethernet-порт передаются в локальную сеть. Сигнал средней фазы всех сгустков по каналу быстрой передачи передается на вход системы обратной связи ВЧ-станции.

К началу 47-го сеанса оборудование (рис. 5.8) было смонтировано на нуклотроне, и в ходе сеанса совместно со специалистами ИЯФ СО РАН было проведено испытание.

Примеры измеренных зависимостей средней фазы всех сгустков от времени с момента начала ускорения пучка до момента выключения ВЧ-напряжения представлены на рис. 5.9. Приведем их общие особенности.

1. Монотонное изменение фазы, связанное с изменением частоты ускоряющего напряжения и вызванное неодинаковостью суммарных длин кабелей

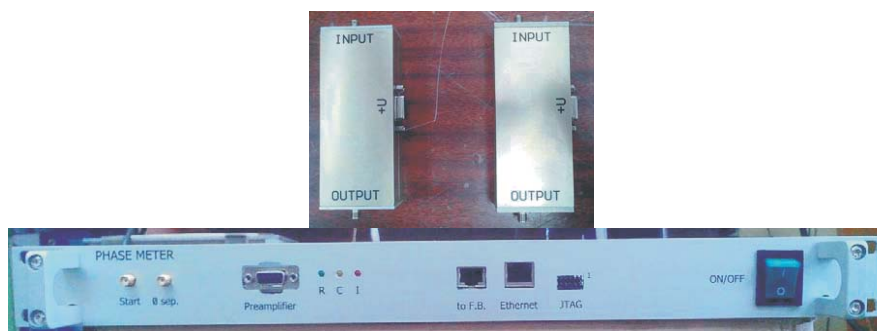


Рис. 5.8. Внешний вид предусилителей и передней панели основного блока измерителя фазы

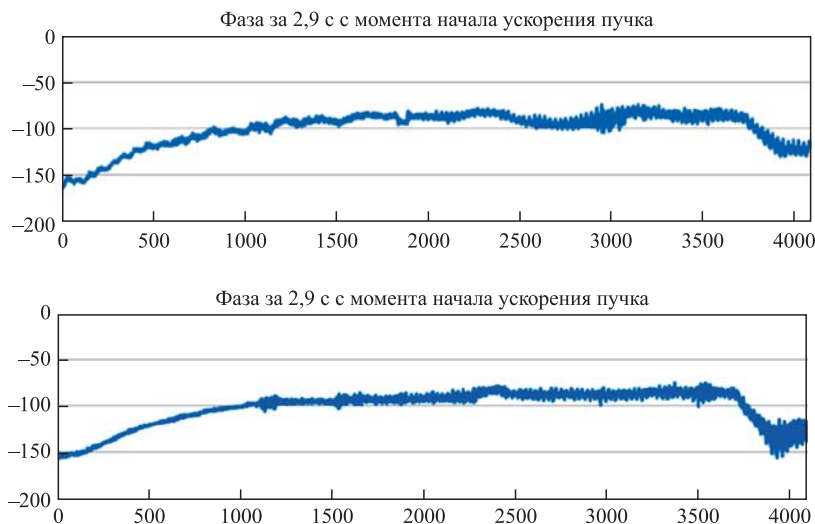


Рис. 5.9. Поведение фазы пучка с момента начала ускорения пучка до момента выключения ВЧ-напряжения. Верхняя кривая — включены обе ВЧ-станции нуклотрона; нижняя кривая — включена только первая ВЧ-станция

в каналах сигнала пучка и ВЧ-напряжения. Если исходить из суммарного изменения фазы примерно на 70° при изменении частоты от 0,5 до 5,5 МГц, то разница длин составляет около 7 м.

2. Изменение фазы примерно на 40° в последние 100–200 мс перед выключением ВЧ-напряжения, что вызвано окончанием ускорения пучка и выходом на «стол».

В результате продемонстрирована работоспособность полученного оборудования, в ближайших сеансах планируется более аккуратная его настройка с целью определения реальной точности измерений. Кроме того, измерение фаз сгустков планируется проводить при продолжении работ по адиабатическому захвату.

6. ИССЛЕДОВАНИЯ СТОХАСТИЧЕСКОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

Для исследования различных методов охлаждения пучка, применение которых планируется в коллайдере комплекса NICA, на нуклотроне был создан тестовый канал стохастического охлаждения. Его изготовление было начато в середине 2010 г., а в декабре 2011 г., в ходе 44-го сеанса, оборудование было впервые протестировано на пучке [6]. В первую очередь были проведены измерения дробового шума пучка (шум Шоттки) во всей полосе пропускания

канала (при этом анализатор спектра последовательно подключался в разных точках) и экспериментально измерены величины импульсного разброса для пучка дейтронов (d) и ионов углерода (C^{6+}) в широком диапазоне энергий. В ходе последующих сеансов были освоены методики настройки элементов канала, разработано необходимое программное обеспечение.

На первом этапе исследований было решено реализовать стохастическое охлаждение продольной степени свободы методом гребенчатого фильтра (так называемого нотч-фильтра) как наименее критичное к качеству настройки ускорителя. Этот метод заключается в следующем: в цепь обратной связи, передающей сигнал от пикап-электрода к кикеру, включается радиотехнический фильтр, который «вырезает» из основного сигнала гармоники частоты обращения равновесной частицы и инвертирует фазу сигнала. Конструктивно фильтр устроен так, что входящий сигнал разделяется на два равных сигнала, один из которых задерживается на период обращения пучка, после чего сигналы вычитаются. Для системы стохастического охлаждения будущего накопителя HESR (проект FAIR) в исследовательском центре Юлиха (FZ Juelich) был предложен оптический фильтр. Из-за простоты создания и превосходных характеристик подобный фильтр был выбран и для системы стохастического охлаждения на нуклотроне. Схема созданного гребенчатого фильтра приведена на рис. 6.1.

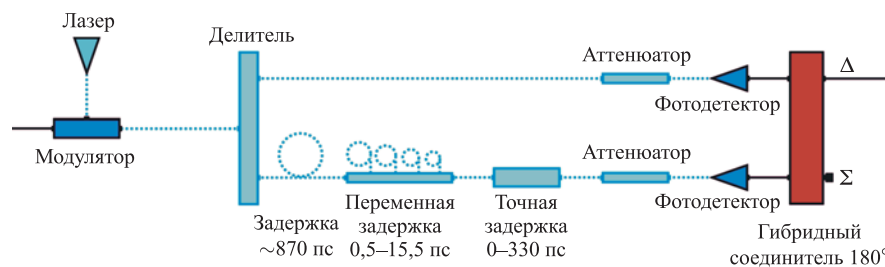


Рис. 6.1. Схема оптического гребенчатого фильтра

С помощью модулятора лазерный свет модулируется входным радиочастотным сигналом, преобразующим его в оптический. Далее сигнал разделяется на две ветви. В нижней ветви установлена переменная задержка 850–865 нс, обеспечивающая работу в диапазоне энергий $\sim 3\text{--}4$ ГэВ. Задержка состоит из катушки оптоволокну, оптического коммутатора 0,5–15 нс с шагом 0,5 нс и модуля прецизионной задержки 0–650 пс с точностью 0,01 пс. В обеих ветвях установлены переменные аттенюаторы. Аттенюатор в верхней ветви используется для компенсации потерь линии задержки. Подобные устройства обладают существенными вносимыми потерями, которые превосходят потери в линии задержки, поэтому аналогичный аттенюатор установлен и в нижней

ветви фильтра. Здесь он также играет роль ключа — для разрыва ветви при настройке задержки в линии обратной связи. Оптические сигналы в обеих ветвях далее переводятся обратно в радиочастотные с помощью фотодетекторов и вычитаются. Фильтр работает в диапазоне частот 2–4 ГГц, вносимые потери порядка 25–27 дБ. Амплитудочастотная и фазочастотная характеристики созданного фильтра приведены на рис. 6.2.

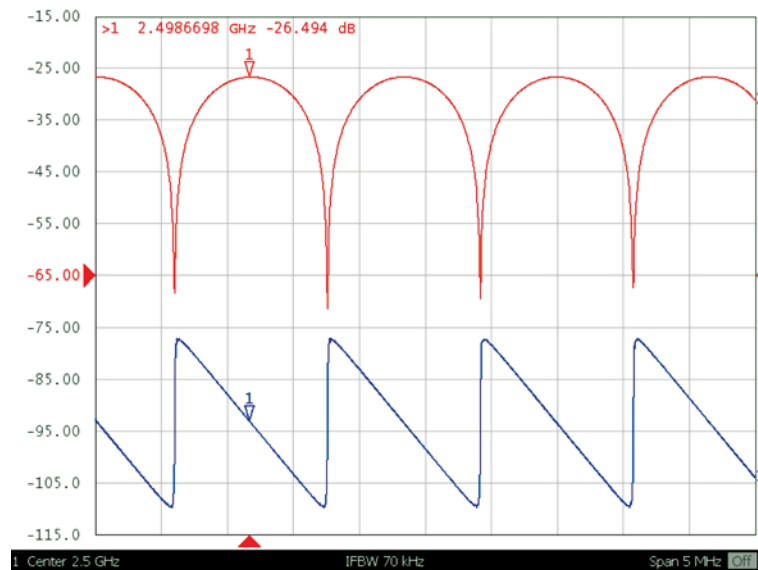


Рис. 6.2. Амплитудочастотная (красная кривая) и фазочастотная (синяя кривая) характеристики фильтра, измеренные в диапазоне $2,5 \text{ ГГц} \pm 5 \text{ МГц}$

Важнейшей характеристикой фильтра является средняя в рабочей полосе величина затухания в минимумах. Для созданного фильтра она составляет более 40 дБ, в то время как для коаксиальных фильтров — порядка 25 дБ, а для коаксиально-оптических — около 35 дБ. Максимальное отклонение положений минимумов (дисперсия) менее 10 кГц, что соответствует сдвигу частоты настройки всего на несколько Гц. Для коаксиально-оптических фильтров дисперсия частоты настройки составляет порядка 25 Гц.

Впервые точная настройка созданного гребенчатого фильтра была проведена на нуклотроне в ходе 46-го сеанса. Пример влияния фильтра на характеристики шумового сигнала пучка приведены на рис. 6.3. Настройка фильтра на заданную частоту означает, что положения минимумов амплитудно-частотной характеристики совпадают с гармониками этой частоты во всей рабочей полосе. В полосе обычно находится несколько тысяч гармоник,

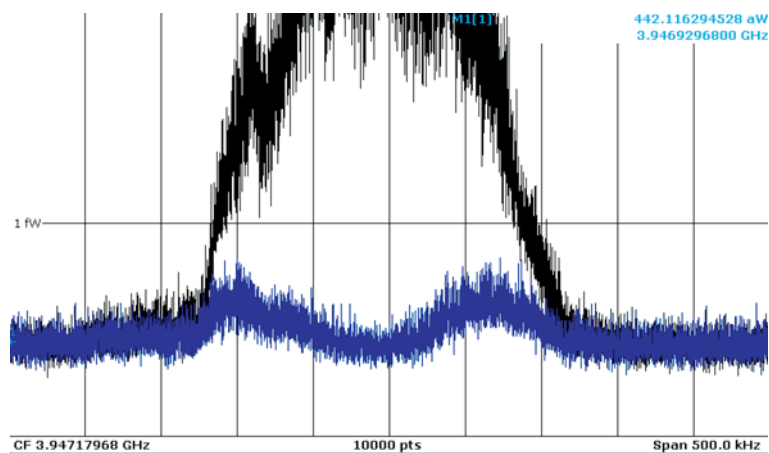


Рис. 6.3. Дробовой шум пучка (полоса Шоттки) на 3048-й гармонике частоты обращения: сигнал с выключенным фильтром (черный) и включенным (синий)

и требуется провести большое количество измерений для настройки фильтра с заданной точностью. Процесс настройки фильтра весьма трудоемок и, как правило, требует длительного времени.

Для осуществления охлаждения пучка кроме настройки фильтра должна быть так же прецизионно настроена общая задержка в цепи обратной связи. Ее настройка осуществляется по схеме с разомкнутой цепью: линия обратной связи размыкается перед входом основного усилителя, и в этой точке располагается сетевой анализатор. Подробно методика настройки и предварительные результаты описаны в [3]. В ходе 46-го сеанса при измерениях с разомкнутой цепью пучок при выходе на «стол» поля адиабатически распускался, что обеспечивало малое значение относительного разброса частиц по импульсу (на уровне $(1-2) \cdot 10^{-4}$). В результате удалось получить четкие сигналы отклика во всем рабочем диапазоне частот (рис. 6.4).

Настройка системы в 46-м сеансе заняла почти две «ускорительные» смены, в результате удалось зафиксировать отклик пучка на воздействие обратной связи: положение максимума функции распределения смещалось от начального, а ширина спектра шума Шоттки увеличивалась. Точную подстройку параметров системы по эффекту не удалось произвести из-за недостатка времени.

При подготовке к 47-му сеансу для ускорения процедуры настройки было разработано программное обеспечение, автоматизирующее настройку фильтра и позволяющее проводить ее удаленно. Настройка может быть произведена в полностью автоматическом режиме и занять 5–10 мин в зависимости от точности предварительной настройки. Она состоит из двух этапов —

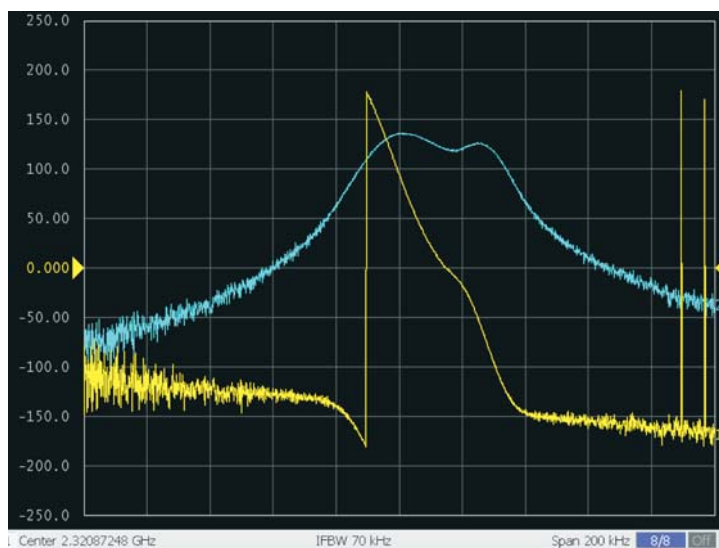


Рис. 6.4. Измерения с разомкнутой цепью на 2004-й гармонике частоты обращения. Верхняя/нижняя кривые — амплитудный/фазовый отклик

настройки частоты фильтра и настройки затухания прямой ветви. Алгоритм настройки частоты следующий. Сканируя положения минимумов в диапазоне, программа находит текущую частоту, на которую настроен фильтр. Если ее отличие от нужной частоты превосходит допустимый порог, то программа соответственно корректирует задержку линии обратной связи и снова проводит измерения до получения требуемой точности. Допустимая точность, оцененная путем моделирования процесса охлаждения с различными отклонениями настройки фильтра, должна быть не менее 50 Гц. Практически же настройка проводится с точностью 5–7 Гц. Изменение задержки в нижней ветви фильтра изменяет ее уровень затухания, из-за чего уменьшается глубина минимумов АЧХ. Поэтому после настройки частоты фильтра настраивается затухание линии обратной связи. Последовательно изменяя затухание в прямой ветви и вычисляя среднее значение и среднеквадратичное отклонение глубины минимумов в полосе, программа находит оптимальное значение затухания.

В ходе 47-го сеанса (в течение одной смены) система была настроена, оптимизированы параметры обратной связи и зарегистрирован эффект уменьшения импульсного разброса частиц в распущенном пучке (рис. 6.5). Среднеквадратичный разброс по импульсу был уменьшен примерно в 2,2 раза в течение 480 с. Для большей наглядности наблюдаемого эффекта начальный относительный разброс был искусственно увеличен до $0,55 \cdot 10^{-3}$ за счет

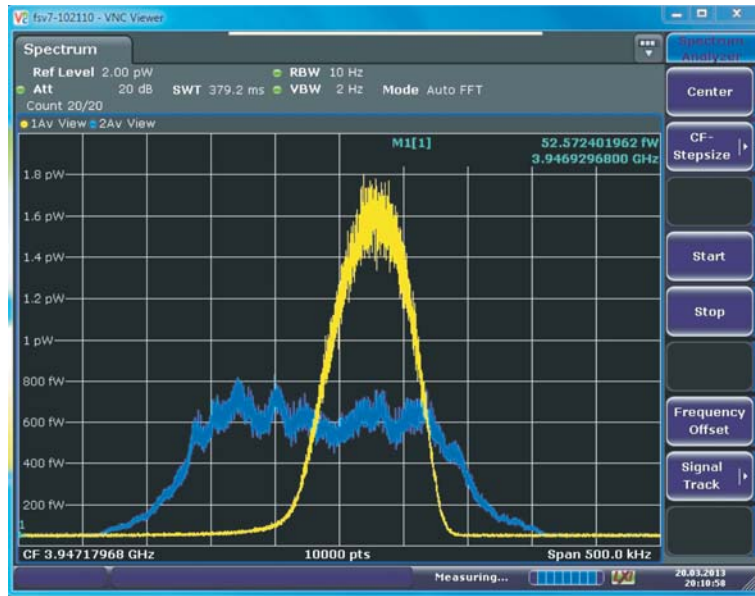


Рис. 6.5. Спектр продольного дробового шума пучка на 3048-й гармонике частоты обращения. Нижняя кривая (голубая) — сразу после инъекции, желтая кривая — после 8 мин охлаждения. Энергия дейтронов 3 ГэВ/нуклон, интенсивность пучка 10^9 частиц

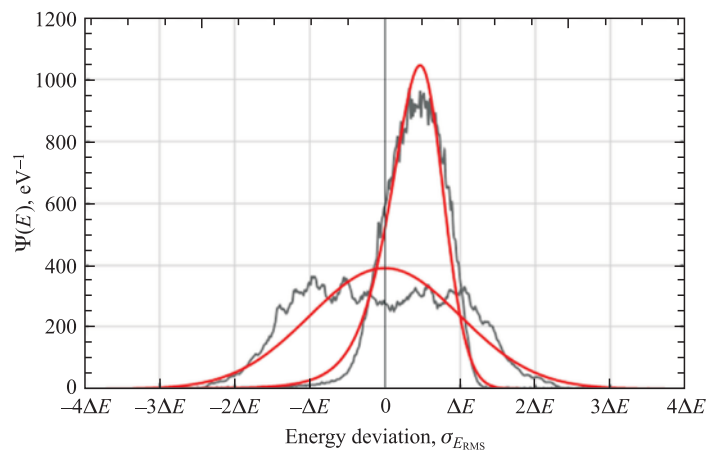


Рис. 6.6. Результат моделирования процесса охлаждения при усилении в цепи обратной связи 110 дБ, погрешности задержки сигнала 20 пс и погрешности задержки в фильтре 10 пс. Экспериментальные (серые) и теоретические (красные) начальные и конечные распределения

скачкообразного выключения ускоряющего напряжения при выходе на «стол» поля. Конечный разброс составил $0,25 \cdot 10^{-3}$.

Для интерпретации полученного результата было проведено моделирование эволюции функции распределения частиц по энергии $\Psi(E)$ путем численного решения уравнения Фоккера–Планка [7]. Основной усилитель системы работал вблизи насыщения, и полное усиление в цепи обратной связи может быть оценено примерно в 110 дБ. Погрешности настройки цепи обратной связи, дающие наилучшее совпадение результата моделирования с экспериментом (рис. 6.6), имеют вполне разумные значения.

Как показывает моделирование, при идеальной настройке системы можно ожидать уменьшения времен охлаждения примерно в два раза.

Кроме того, в 47-м сеансе были проведены наблюдения спектров дробового шума пучка, соответствующего бетатронным колебаниям частиц. Система рассчитана на охлаждение тяжелых многозарядных ионов, поэтому для дейтронов сигнал незначительно превышает уровень шумов (рис. 6.7); несмотря на это можно достаточно точно оценить дробные части частот горизонтальных (q_x) и вертикальных (q_y) колебаний частиц:

$$q_x \approx 0,28, \quad q_y \approx 0,32.$$

Результаты экспериментов по стохастическому охлаждению пучков чрезвычайно важны для развития проекта NICA. Также эти эксперименты являются комплексной проверкой надежности работы всех систем нуклотрона и демонстрацией возросших возможностей машины. В течение полной смены система криогенного обеспечения, магнитная система, источники питания, циклозадающая аппаратура, система диагностики надежно отработали в режиме длительной циркуляции пучка на «столе» магнитного поля, которая последовательно увеличивалась с нескольких десятков секунд до восьми минут.

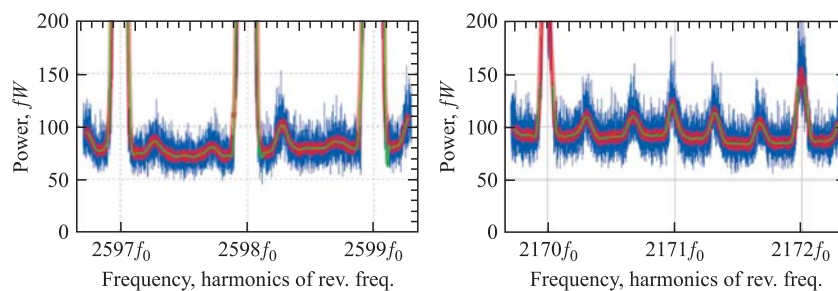


Рис. 6.7. Горизонтальный (правая спектрограмма) и вертикальный (левая спектрограмма) дробовый шум пучка. По горизонтальной оси — номер гармоники частоты обращения, по вертикальной — мощность шума в фемтоваттах

7. РАЗВИТИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Существующая система управления ускорительного комплекса ЛФВЭ создавалась в начале 1990-х гг. одновременно с вводом в эксплуатацию нуклотрона. Многие ее подсистемы физически и морально устарели. Программное обеспечение не полностью совместимо с современными операционными системами, кроме того, интеграция различных подсистем в общую систему управления ускорительного комплекса практически невозможна. Решение этой проблемы было начато в ходе модернизации нуклотрона, когда были созданы и введены в эксплуатацию современные системы автоматического управления вакуумным оборудованием кольца, АСУ криогенного комплекса, созданы новые АСУ системы инъекции и подсистемы диагностики пучка медленного вывода [1, 4].

Однако для сооружаемого комплекса NICA необходимо создание единой системы управления, способной контролировать большое количество разнородного оборудования: источников ионов, линейных и циклических ускорителей, устройств перевода и каналов транспортировки пучков и т. д. Из нескольких доступных и применяемых на ускорительных комплексах систем, таких как Tango, Epics, SCADA, для ускорительного комплекса NICA была выбрана Tango (Taco Next Generation Objects) — современная объектно-ориентированная распределенная система, развиваемая несколькими ускорительными и программистскими центрами [8]. Эта же система принята за основу и для международного исследовательского комплекса FAIR.

Концепция построения АСУ была представлена Международному экспертному совету по ускорительной части проекта NICA (MAC — Machine Advisory Committee) в июне 2012 г. MAC в качестве одной из задач высшего приоритета обозначил необходимость в кратчайшие сроки осуществить экспериментальную проверку возможностей системы на существующем ускорительном комплексе.

7.1. Структура и функции системы Tango. Tango представляет собой программный комплекс среднего слоя (middleware) на основе CORBA, позволяющий связать разрозненные элементы управления подсистемами и устройствами ускорительного комплекса в единую сетевую распределенную систему управления. Программные компоненты, выполненные в формате Tango, имеют возможность прозрачного сетевого взаимодействия между собой, при этом вся необходимая работа по поддержанию сетевой активности скрыта Tango и предоставляется программисту в виде интерфейса высокого уровня, позволяющего исполнять команды устройств, читать и записывать данные.

Tango предоставляет необходимые средства централизованного управления — автоматический запуск серверов устройств на удаленных компьютерах, контроль их состояния, назначение прав доступа пользователей, контроль

допустимых границ данных, соответствие установленных и измеренных параметров, архивирование данных.

Для реализации законченной системы управления необходимо создание программ (серверов устройств) нижнего уровня, управляющих аппаратурой и собирающих данные, программ обработки данных (серверы Tango высокого уровня) и клиентских приложений, которые отображают данные и предоставляют оператору возможности управления аппаратурой. При этом возможно создание различных уровней клиентских приложений — как локальных, управляющих определенной подсистемой, так и более общих, комбинирующих данные, полученные от различных серверов устройств. Tango поддерживает C++, Python и Java для создания приложений. Кроме того, поддерживаются Matlab и LabVIEW для разработки клиентских приложений.

Основные сервисы системы управления Tango исполняются на виртуальных серверах на основе системы виртуализации Proxmox VE, развернутой на двух высокопроизводительных серверах Supermicro. Каждый из сервисов исполняется на выделенном виртуальном сервере, который включает в себя базу данных Tango, ее резервную копию, среду разработки под Linux и Windows, систему архивации данных. Для разработчиков предоставляются следующие сервисы:

- система управления версиями Subversion (SVN) для хранения и доступа к исходным кодам серверов устройств и клиентских приложений;
- система ведения документации DokuWiki;
- система непрерывной интеграции Jenkins для автоматической сборки проектов на C++ под Windows и Linux и LabView под Windows;
- система отслеживания ошибок Bugzilla.

7.2. Опытный сегмент АСУ комплекса NICA. К началу 46-го сеанса была создана необходимая инфраструктура опытного сегмента АСУ NICA на основе системы Tango (рис. 7.1). Были разработаны приложения Tango для управления оборудованием через последовательный порт, USB- и TCP/IP-сокеты с использованием протоколов Modbus/RTU/TCP, Profibus, NI-VISA. Разработаны драйверы Tango для управления источниками питания EVPU и Spellman. Кроме того, созданы серверы Tango для управления оборудованием National Instruments, которые включают

- цифровой и аналоговый ввод и вывод, генерацию и счет импульсов, измерение интервалов времени на основе драйверов NI-DAQmx;
- цифровые мультиметры на основе драйверов NI-DMM;
- высокоскоростные дигитайзеры на основе драйверов NI-SCOPE.

Одной из основных задач 46-го и 47-го сеансов являлось проведение работ по внедрению элементов системы управления ускорительного комплекса ЛФВЭ.

Первые тесты элементов системы управления нуклотрона в составе Tango показали следующее:

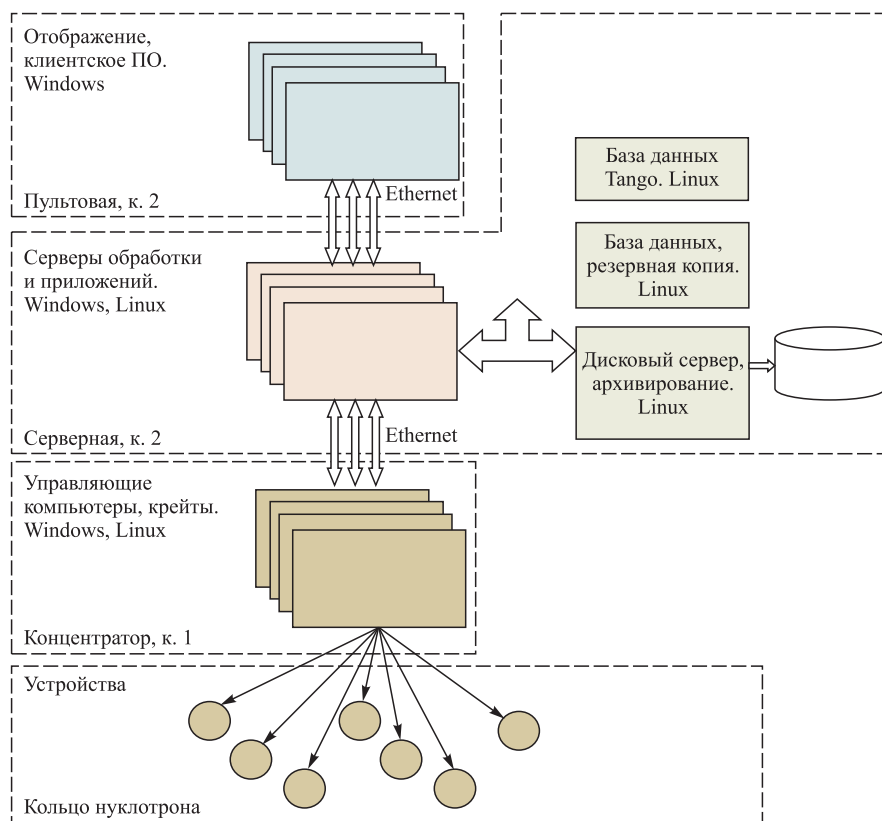


Рис. 7.1. Общая структура системы управления

- использование Tango позволяет существенно ускорить разработку программного обеспечения как серверной части (за счет использования автоматической генерации кода при помощи средств Tango), так и клиентской (за счет упрощения сетевого взаимодействия);

- централизованное управление программным обеспечением, разделение прав доступа, сохранение настроек серверов в базе данных значительно упрощает запуск и контроль распределенных систем обработки данных.

В течение 46-го и 47-го сеансов введены в эксплуатацию две законченные подсистемы: инъекции и медленного вывода.

7.3. Подсистема управления и диагностики инъекции в нуклотрон.

Подсистема предназначена для управления однооборотной инъекцией пучка ионов из линейного ускорителя ЛУ-20 в кольцо нуклотрона. Аппаратная часть системы включает в себя управляемые источники питания инфлек-

торного магнита EVPU PS140-8 и инфлекторных пластин Spellman SL300, блоки управления питания и запуска тиратрона, микроконтроллерный блок управления задержками и блокировками, а также аппаратуру диагностики — блоки сбора данных NI USB-6259 и дигитайзер NI PCI-5105.

Программная часть системы состоит из нескольких программных модулей: серверов управления источниками питания, сервера управления задержками и блокировками, серверов для обмена данными с устройствами сбора данных National Instruments, высокоуровневого сервера Tango для реализации алгоритма управления и клиентского программного обеспечения.

Система позволяет устанавливать и измерять напряжение источников питания инфлекторного магнита и инфлекторных пластин, а также синхронизировать включения тиратрона, высоковольтного источника и блока дожига в зависимости от длительности цикла нуклотрона. Диагностика пучка включает в себя сбор сигналов поперечных профилей в канале инжекции и динамических сигналов инжекции.

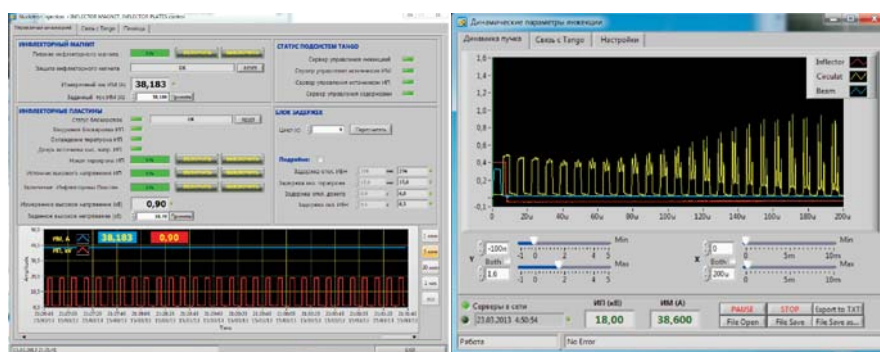


Рис. 7.2. Клиентские приложения системы управления и диагностики инжекции

На рис. 7.2 показаны окна клиентских приложений подсистемы, отображающие интерфейс управления инжекцией и сигналы диагностики пучка.

7.4. Подсистема диагностики медленного вывода. Подсистема предназначена для измерения пространственных характеристик выведенного пучка в канале транспортировки с использованием проволочных пропорциональных камер и измерения интенсивности пучка с помощью ионизационной камеры. Управление газовым усилением пропорциональных камер производится изменением высокого напряжения, а диапазон измерения интенсивности пучка выбирается изменением коэффициента усиления усилителя тока в диапазоне 10^3 – 10^9 В/А.

Аппаратная часть состоит из многофункционального блока сбора данных NI USB-6259, многоканального блока вывода NI PCI-6703, усилителя тока

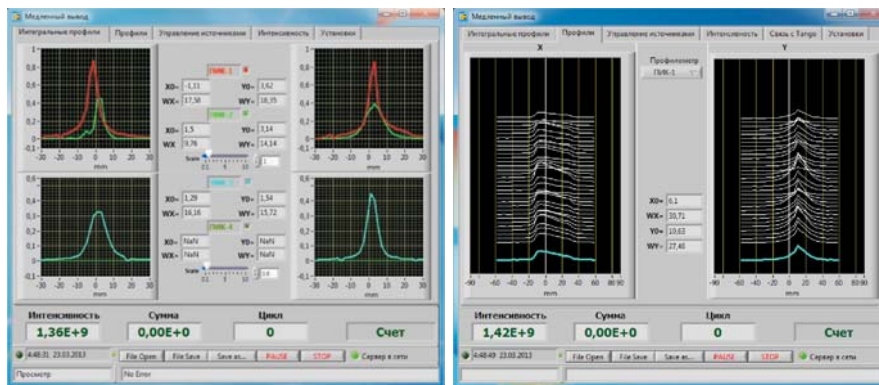


Рис. 7.3. Клиентские приложения системы диагностики медленного вывода

FEMTO DLPCA-200, блока преобразования напряжение–частота, высоковольтных источников Wenzel N1130-4. Программная часть системы включает в себя низкоуровневые серверы Tango управления блоками ввода–вывода National Instruments, высокоуровневого сервера Tango сбора данных и реализации алгоритма управления, а также клиентского программного обеспечения, включающего в себя веб-клиент. На рис. 7.3 показаны окна клиентского приложения, отображающие интегральные профили пучка, динамические профили, а также интенсивность выведенного пучка.

Данные об интенсивности пучка и его пространственных характеристиках в каждом цикле работы ускорителя сохраняются в базу данных.

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В одной публикации невозможно подробно осветить все работы, проводимые на ускорительном комплексе. В работе [9] обсуждаются основные направления продолжающегося активного развития криогенного комплекса. По завершении модернизации вакуумной системы на нуклотроне был проведен ряд экспериментальных исследований давления и состава остаточного газа в пучковой камере при различных параметрах цикла магнитного поля, результаты которых приведены в статье [10]. Большой прогресс достигнут в развитии источников ионов, изготавливается новый линейный ускоритель тяжелых ионов, начаты работы по модернизации форинжектора ЛУ-20 — основные результаты этих работ представлены в докладе [11]. В настоящее

время готовится публикация по результатам исследования процессов в короткозамкнутом витке магнита Ламбертсона.

Из перспективных работ, проведенных на ускорительном комплексе между сеансами, можно выделить модернизацию поворотного магнита ЗСП-12, осуществляющего поворот пучка с направления канала ВП-1 на направление канала бв в зону эксперимента ВМ@N (Baryonic Matter at Nuclotron). Существовавшая до недавнего времени конфигурация межполюсного зазора данного магнита при необходимом повороте пучка ограничивала максимальную жесткость p/z (p — импульс иона, z — зарядовое число) величиной $\leq 10,4$ ГэВ/с. Для обеспечения проектной величины было проведено усиление магнита: демонтированы старые «нестандартные» накладки на основные полюса магнита и установлена новая пара накладок $3000 \times 500 \times 50$, сформировавшая рабочий зазор магнита $d = 100$ мм. Кроме того, была выполнена коррекция ориентации магнита по отношению к входному и выходному направлениям пучка, а также проведены тестовые измерения. Экспериментальная оценка интеграла основной компоненты магнитного поля проводилась путем измерения поля в центре магнита при помощи калиброванного датчика Холла и одновременных измерений с использованием токонесущей нити (рис. 8.1). Угол поворота нити в данных измерениях определялся центром входного окна коллиматора канала бв и равнялся $\varphi \cong 153$ мрад. С учетом возможных погрешностей точность полученных интегралов и соответствующих им жесткостей пучка может быть оценена величиной 1–2 %.

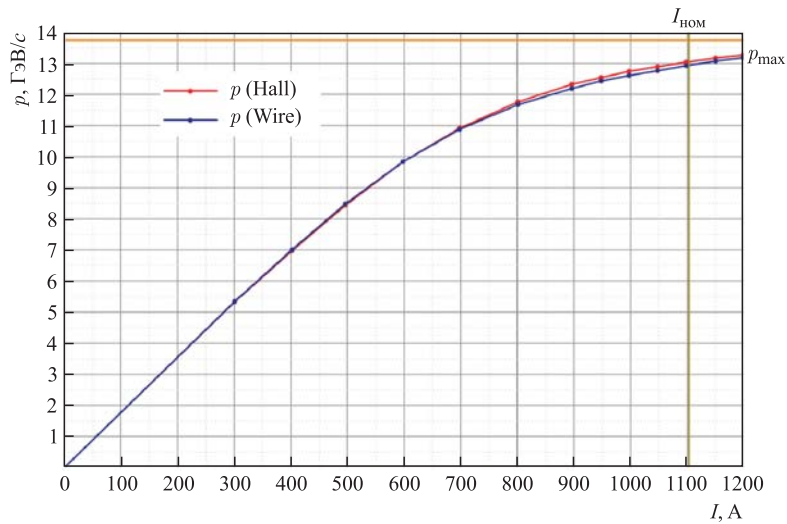


Рис. 8.1. Результаты проведенных измерений в рабочем диапазоне токов модернизированного магнита ЗСП-12

Таким образом, при номинальном токе 1100 А обеспечивается необходимый поворот пучка с жесткостью не менее 13 ГэВ/с (что соответствует кинетической энергии 5,7 ГэВ/нуклон для ядер с $Z/A = 1/2$ и 4,4 ГэВ/нуклон для ядер золота), т. е. не менее 95 % от соответствующей проектной величины нуклотрона. Для обеспечения возможности работы при максимальной энергии на канале бв необходимо проведение дополнительных работ, программа которых в настоящее время обсуждается.

Важность этой работы обусловлена тем, что VM@N — первый эксперимент по исследованию свойств плотной и горячей сильно взаимодействующей материи в рамках экспериментальной программы комплекса NICA, начало которого намечено на 2016 г.

Для комплексной проверки состояния всех систем нуклотрона и как один из этапов тестирования созданного источника КРИОН-6Т на один из ближайших сеансов запланировано ускорение ионов с массовым числом в интервале 150–200.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Аверичев А. С. и др.* Итоги 42-го и 43-го сеансов нуклотрона. Сообщ. ОИЯИ Р9-2011-72. Дубна, 2011.
2. *Иванов Е. В. и др.* Система детектирования перехода в нормально проводящую фазу сверхпроводящих магнитов ускорительного комплекса нуклотрон // Письма в ЭЧАЯ. 2013. Т. 10, №4(181). С. 603–612.
3. *Аверичев А. С. и др.* Итоги 44-го и 45-го сеансов нуклотрона. Сообщ. ОИЯИ Р9-2012-108. Дубна, 2012.
4. *Аверичев А. С. и др.* Итоги 40-го и 41-го сеансов нуклотрона. Сообщ. ОИЯИ Р9-2010-68. Дубна, 2010.
5. *Аверичев А. С. и др.* Итоги 39-го сеанса нуклотрона. Сообщ. ОИЯИ Р9-2009-131. Дубна, 2009.
6. *Волков В. И. и др.* Моделирование адиабатического захвата пучка нуклотрона в режим ускорения. Сообщ. ОИЯИ Р9-2003-154. Дубна, 2003.
7. *Трубников Г. В., Шурхно Н. А., Сидорин А. О.* Моделирование процесса стохастического охлаждения с помощью уравнения Фоккера–Планка. Расчет конструкции системы стохастического охлаждения для нуклотрона // Вестн. Санкт-Петербургского ун-та. 2012. Т. 1, сер. 10. С. 70.
8. *Taurel E. (Tango Collab. and Kernel Status).* ESRF, Grenoble, France on behalf of the Tango community ALBA, DESY, ELETTRA, ESRF, FRM-II, MAX-LAB, SOLEIL // Proc. of ICALEPCS'11, 2011.

9. *Агапов Н. Н. и др.* Развитие и реконструкция криогенной системы ЛФВЭ для ускорительного комплекса NICA (2012–2015 гг.). Сообщ. ОИЯИ Р8-2012-14. Дубна, 2012.
10. *Нестеров А., Бутенко А., Сидорин А.* Геттерный насос и его работа в откачной системе пучковой камеры нуклотрона. Сообщ. ОИЯИ Р9-2013-66. Дубна, 2013.
11. *Butenko A. V. et al.* Development of the NICA Injection Facility // Proc. of IPAC-13. Shanghai, China, 2013;
<http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/IPAC2013/papers/thpwo069.pdf>.

Получено 25 декабря 2013 г.

Редактор *Е. В. Сабеева*

Подписано в печать 24.01.2014.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 3,06. Уч.-изд. л. 3,74. Тираж 235 экз. Заказ № 58165.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/