

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
Дубна

P9-2009-131

ИТОГИ 39-го СЕАНСА НУКЛОТРОНА

2009

ВВЕДЕНИЕ

39-й сеанс работы ускорительного комплекса нуклотрон имел главной задачей тестирование и ввод в эксплуатацию модернизированного криогенного оборудования. Кроме того, планировалось испытание новых датчиков перехода и ключей эвакуации энергии при величине поля в магнитах до 1,5 Тл, ввод в эксплуатацию первой очереди системы автоматического контроля и управления вакуумным оборудованием, отладка новой системы управления циклом магнитного поля, продолжение экспериментов по оптимизации динамики частиц. В случае успешного выполнения «ускорительных» задач сеанса был запланирован ряд экспериментов на пучках ускоренных дейтронов.

Тестирование и ввод в эксплуатацию модернизированных установок КГУ-1600/4.5 были начаты 9 марта 2009 г. и успешно завершены к 15 мая. 2 июня была начата работа с пучком на ускорителе ЛУ-20, а 8 июня — охлаждение магнитной системы кольца нуклотрона. 13 июня после настройки основных систем был получен пучок ускоренных дейтронов. К сожалению, техническое состояние некоторых, еще не модернизированных технологических систем (в первую очередь это относится к компрессорному оборудованию) не позволило гарантировать надежную продолжительную работу комплекса, и сеанс был штатно завершен 23 июня. В ходе сеанса

была успешно реализована большая часть программы ускорительных экспериментов; в течение 4 смен проведены измерения на выведенном пучке дейтронов с энергией 0,5 и 2,1 ГэВ/нукл. по программе «Энергия плюс трансмутация», выполнены исследования, запланированные по эксперименту «Беккерель».

Основными итогами «ускорительных» смен являются следующие:

- введена в опытную эксплуатацию новая система управления циклом магнитного поля, в течение всего сеанса проводилась ее поэтапная наладка, отработано несколько режимов работы ускорителя,
- успешно введена в эксплуатацию первая очередь системы автоматического контроля и управления вакуумным оборудованием,
- испытана аппаратура, подготовленная для реализации адиабатического захвата пучка в режим ускорения, продемонстрирована ее работоспособность,
- успешно испытаны прототипы элементов автоматизированной системы измерения и коррекции орбиты,
- проведено комплексное испытание систем питания и защиты при поле в магнитах 1,5 Тл,
- введена в эксплуатацию и протестирована система контроля токов в элементах магнитной оптики на каналах выведенных пучков.

1. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕРНИЗАЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ КРИОГЕННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Система криогенного обеспечения ускорительного комплекса ЛФВЭ [1] — крупнейшее в России сооружение для производства жидкого гелия, состоящее из целого ряда машин и аппаратов, выпущенных такими головными предприятиями криогенной отрасли страны, как ОАО «НПО Гелиймаш», ОАО «Криогенмаш», ОАО «НИИтурбокомпрессор», завод «Борец» и др. Это оборудование было запущено в эксплуатацию в начале 1990-х гг. и успешно использовалось для проведения всех сеансов нуклотрона и при промышленном производстве жидкого гелия.

Однако со временем ресурс многих элементов криогенной системы был выработан. Это привело к существенному снижению надежности и экономичности криостатирования сверхпроводящего кольца ускорителя в течение двух предыдущих сеансов — №37, 38 [2]. В связи с этим перед сеансом №39 был проведен капитальный ремонт и полномасштабная модернизация всех низкотемпературных аппаратов — установок КГУ-1600, блоков очистки сжатого гелия МО-800, сепараторов масла и другого оборудования. При этом было необходимо сначала разобрать агрегаты, транспортировать их на заводы-

изготовители в Москву, Балашиху и обратно, а после этого — смонтировать и провести комплексные пусконаладочные работы.

В ходе работ применены современные самоочищающиеся фильтры, убраны старые и засыпаны новые адсорбенты (активированные угли и цеолиты) в 38 крупных аппаратах, работающих при высоком давлении как при температуре окружающей среды, так и при низких температурах. Кроме того, промывкой специальными реактивами с последующей продувкой горячим воздухом были удалены все масляные загрязнения в теплообменной аппаратуре и других элементах системы.

В связи с реконструкцией, проводимой на ОАО «НПО Гелиймаш», часть оборудования была поставлена в ОИЯИ без проведения стандартных заводских испытаний, и по согласованию с производителем эти испытания должны были быть произведены уже в ходе сеанса нуклотрона. Отчасти этим было вызвано увеличение, по сравнению с ожидаемым, времени ввода оборудования в эксплуатацию. Для обеспечения длительной бесперебойной работы в ходе подготовки к сеансу была предложена, опро-

бована и налажена новая схема снабжения системы жидким гелием. Вместо газообразного гелия, доставляемого в специальном железнодорожном вагоне (как это делалось для всех предыдущих сеансов), жидкий гелий подвозился автотранспортом в сосудах Дьюара емкостью 250 л. Это позволяет обеспечивать бесперебойные поставки жидкого гелия абсолютной чистоты в любое время с гарантированной точностью.

В ходе пусконаладочных работ был приобретен, протестирован и введен в эксплуатацию специализированный газоанализатор, позволяющий осуществлять постоянный контроль процентного содержания примесей в газообразном гелии.

Обновленное оборудование проработало в сеансе без каких-либо сбоев. Кроме того, параллельно с работой нуклотрона жидким гелием обеспечивался источник «Крион-2», на котором также проводился экспериментальный сеанс. Срок службы модернизированного оборудования существенно продлен, и оно уже сейчас вполне применимо для задач будущего проекта NICA/MPD.

2. НОВАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЦИКЛОМ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

К началу 39-го сеанса нуклотрона была подготовлена и протестирована новая циклозадающая и обрабатывающая аппаратура, позволяющая:

- формировать задающие полевые сигналы и обрабатывать сигналы реальных полей во всем динамическом диапазоне от 0 до 20 кГц с точностью 0,1 Гс (18 бит),
- обеспечить гальваническую развязку сигналов опорных и обратной связи для регуляторов источников питания структурных магнитов и линз,
- осуществлять коррекцию частот бетатронных колебаний в течение цикла с шагом 1 Гс,
- осуществлять оперативный контроль всех управляющих и служебных сигналов,
- существенно расширить пользовательский интерфейс и диагностику системы формирования полей (рис. 1).

В ходе сеанса был проведен первый этап комплексных пусконаладочных работ по вводу в эксплуатацию модернизированной системы формирования магнитных полей, состоящей из следующих основных узлов:

- индукционных датчиков магнитных полей и аппаратуры преобразования сигналов с датчиков в цифровые серии,
- циклозадающей и обрабатывающей аппаратуры, формирующей опорные функции и обрабатывающей цифровые серии реальных полей, преобразующей с гальванической развязкой цифровые сигналы в аналоговые для регуляторов источников питания,

— источников питания, формирующих поле и градиент поля в магнитах и линзах нуклотрона в соответствии с опорными сигналами и сигналами обратной связи.

В процессе испытаний системы выявлен и устранен ряд технических проблем, осуществлена отладка программного обеспечения. Это позволило в завершающей фазе сеанса добиться относительно устойчивой работы оборудования. Проведено обучение оперативного персонала, отработаны некоторые новые режимы работы ускорителя. В качестве примера на рис. 2 приведено окно графического интерфейса системы при работе с двумя «столами» магнитного поля. Аналогичный режим использовался при тестировании аппаратуры для адиабатического захвата пучка в режим ускорения.

Параллельно с вводом в эксплуатацию новой системы задания цикла осуществлялся второй этап наладки на пучке аппаратуры параметрического трансформатора тока «Bergoz». Он включал в себя:

- регистрацию ведущего магнитного поля,
- масштабирование выходного сигнала с учетом частоты обращения пучка и отображение данных в единицах интенсивности пучка.

На рис. 3 приведен пример графического вывода показаний трансформатора тока.

По итогам сеанса намечен план действий по доработке системы и вводу ее в эксплуатационный режим.

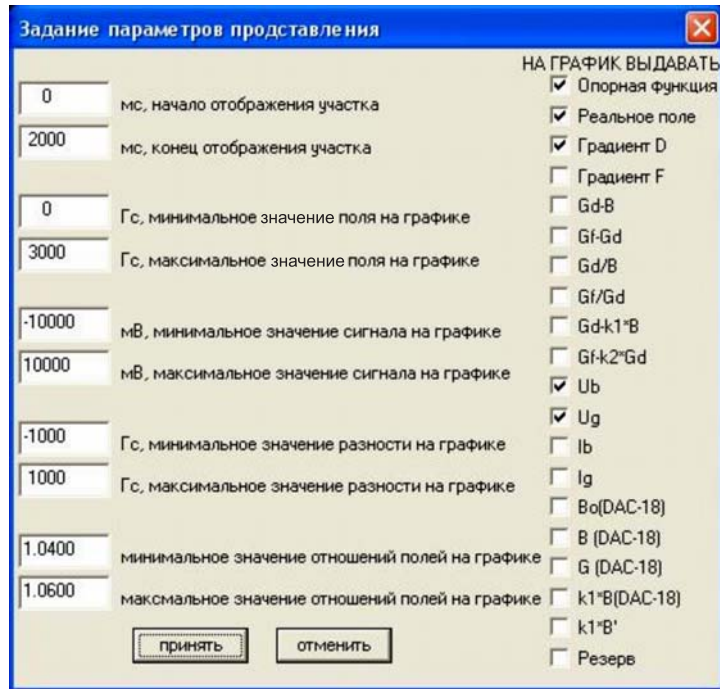


Рис. 1. Элемент пользовательского интерфейса новой системы задания цикла магнитного поля со списком параметров, доступных для оперативного контроля

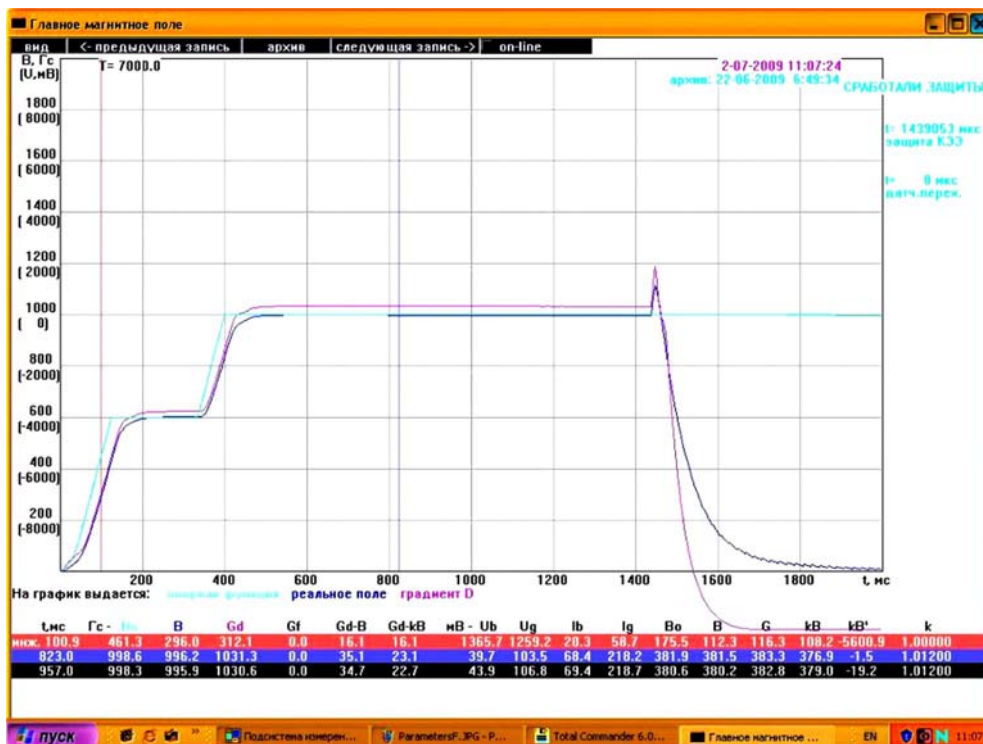


Рис. 2. Пример цикла с двумя «столами» магнитного поля: на 600 Гс и на 1 кГс



Рис. 3. Сигналы параметрического трансформатора тока, соответствующие режиму с двумя «столами» магнитного поля. Нижняя кривая соответствует опорному сигналу магнитного поля, средняя — интенсивности пучка в количестве циркулирующих ионов, верхняя — показаниям трансформатора в вольтах

3. ИСПЫТАНИЕ АППАРАТУРЫ АДИБАТИЧЕСКОГО ЗАХВАТА

К началу сеанса была проведена модернизация одной из ускоряющих станций, необходимая для реализации режима адиабатического захвата. Она включала в себя упрочнение канала предварительного усиления и существенную перера-

ботку входных цепей мощного каскада для снижения шумов. В настоящее время имеется возможность программно (через ЦАП) менять амплитуду ВЧ-напряжения в течение цикла магнитного поля.

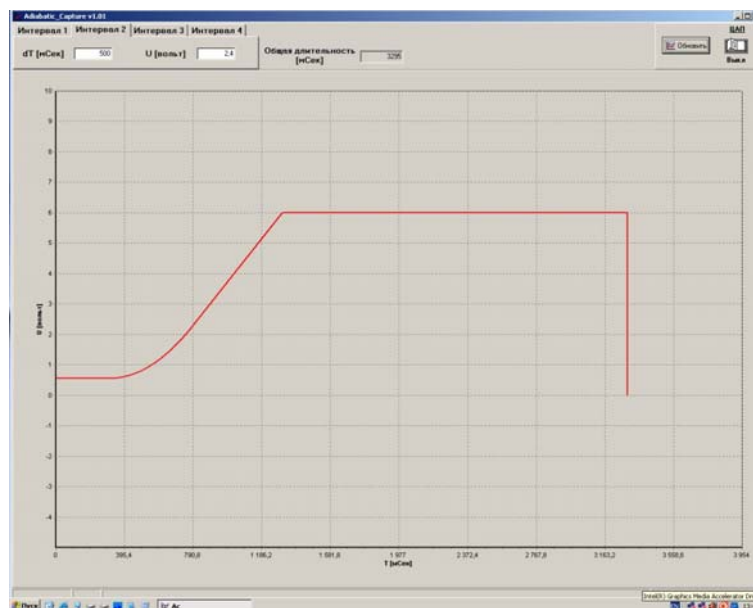


Рис. 4. Элемент пользовательского интерфейса для задания закона изменения амплитуды ВЧ-напряжения в течение цикла магнитного поля

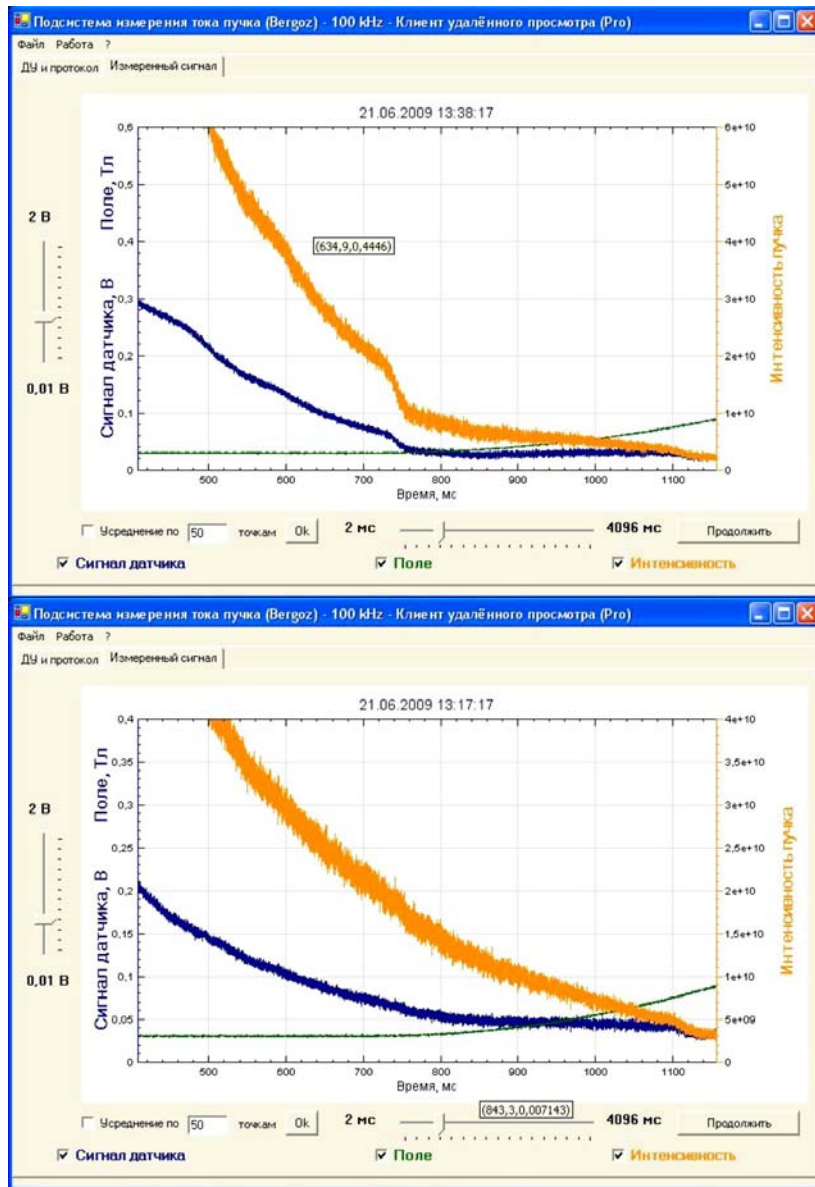


Рис. 5. Сигналы датчика тока при переходе со «стола» инъекции в растущее поле: верхний график — при постоянной амплитуде ВЧ-напряжения, нижний — при линейном росте амплитуды

В этом сеансе минимальное значение напряжения было ограничено величиной примерно 200 В, что объясняется возможностями существующей системы автоматической подстройки частоты (АПЧ). К следующему сеансу планируется внедрение цифровой АПЧ, разработанной нашими болгарскими коллегами, — и это ограничение будет снято.

В данном сеансе аппаратура адиабатического захвата испытывалась по упрощенной схеме: зависимость амплитуды ВЧ-напряжения от времени задавалась в виде последовательности аналитических функций, представляющих линейное или квадратичное изменение (рис.4). Испытание аппаратуры проводилось в цикле с двумя «стола-

ми» магнитного поля: один соответствовал энергии инъекции (примерно 300 Гс), второй — на уровне 1 кГс. При циркуляции пучка на «столе» инъекции изменение амплитуды ВЧ-поля слабо влияет на уровень потерь. Однако при переходе в растущее поле в случае постоянной амплитуды ВЧ-напряжения наблюдается скол на временных зависимостях сигнала датчика тока. Это объясняется уменьшением площади сепаратрисы и потерями частиц из нее (верхний график на рис.5). При адиабатическом захвате частицы заполняют только центральную часть сепаратрисы, кроме того, при переходе в растущее поле можно обеспечить сохранение площади сепаратрисы за счет уве-

личения амплитуды ВЧ-напряжения [3]. В результате переход к ускорению не сопровождается дополнительными потерями (нижний график на рис. 5).

В ходе испытаний продемонстрирована надежная работа модернизированной ВЧ-станции. Детальная оптимизация динамики продольного движения частиц запланирована на ближайший сеанс.

Кроме того, к этому сеансу сигналы огибающих ВЧ-напряжения, результаты измерения бетатронных частот и контроля равновесной орбиты были выведены на управляющие компьютеры в пультовой нуклотрона.

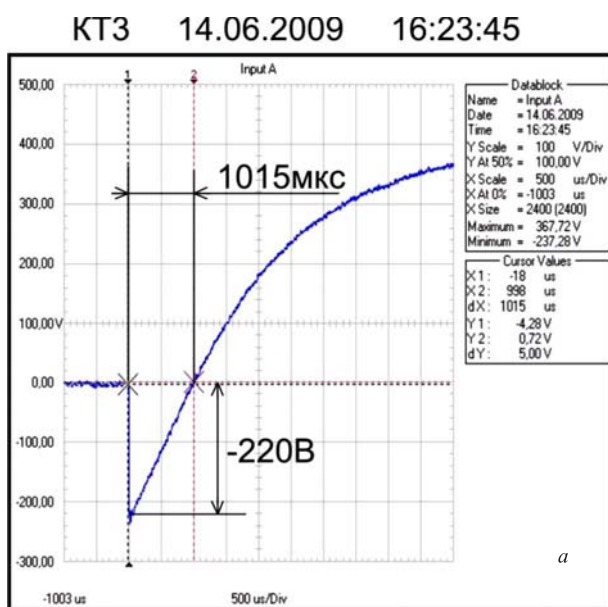
К началу сеанса была проведена экранировка ВЧ-станций, что привело к снижению мощности рассеянных полей примерно в 10–15 раз. Однако уровень наводок на пикап-станции системы измерения орбиты не только не уменьшился, но на некоторых пикапах даже и увеличился. По-видимому, радикальное решение этой проблемы возможно только за счет цифровой обработки сигналов. Прототипы устройств новой системы измерения орбиты были испытаны в ходе сеанса и показали свою высокую эффективность. В ближайшем сеансе планируется установить электронные блоки штатной цифровой системы на все 20 пикап-станций кольца.

4. ИСПЫТАНИЕ КЛЮЧЕЙ ЭВАКУАЦИИ ЭНЕРГИИ

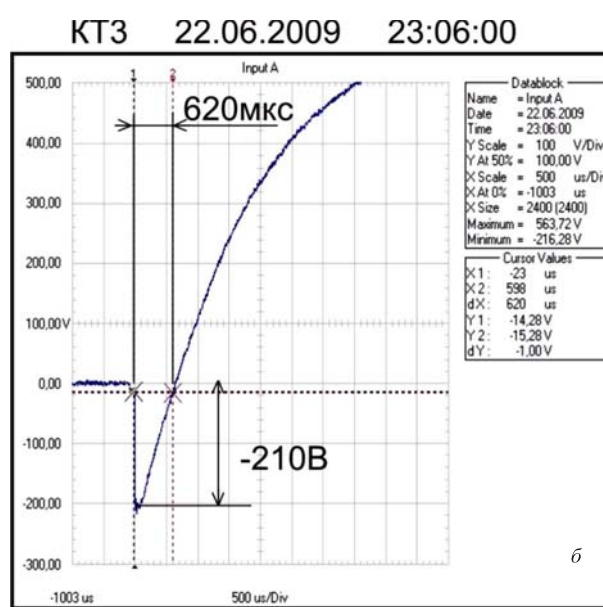
К 39-му сеансу была доработана система эвакуации энергии из сверхпроводящих магнитов и линз нуклотрона для работы с полями до 15 кГс. В ходе сеанса на полях 10 и 15 кГс была проверена работа тиристорных ключей КТ1...7 системы эвакуации энергии при имитации срабатывания датчиков контроля срыва сверхпроводимости (рис. 6).

К сеансу был подготовлен источник токодобавки в дефокусирующие линзы, но его тестовые включения не проводились.

Одним из главных результатов ускорительных смен сеанса явилось успешное комплексное испытание систем защиты и электропитания, проведенное в ходе эксперимента по увеличению магнитного поля. В течение смены практически все системы ускорителя устойчиво отработали в цикле с полем на «столе» величиной 1,5 Тл, и было осуществлено ускорение пучка дейтронов до энергии примерно 3,8 ГэВ/нукл. (рис. 7).



Поле 10 кГс (ток 2,9 кА)



Поле 15 кГс (ток 4,4 кА)

Рис. 6. Осциллограммы напряжения на силовом тиристоре типа Т173-4000-10 ключа тиристорного КТ3 при имитации срабатывания датчиков контроля срыва сверхпроводимости

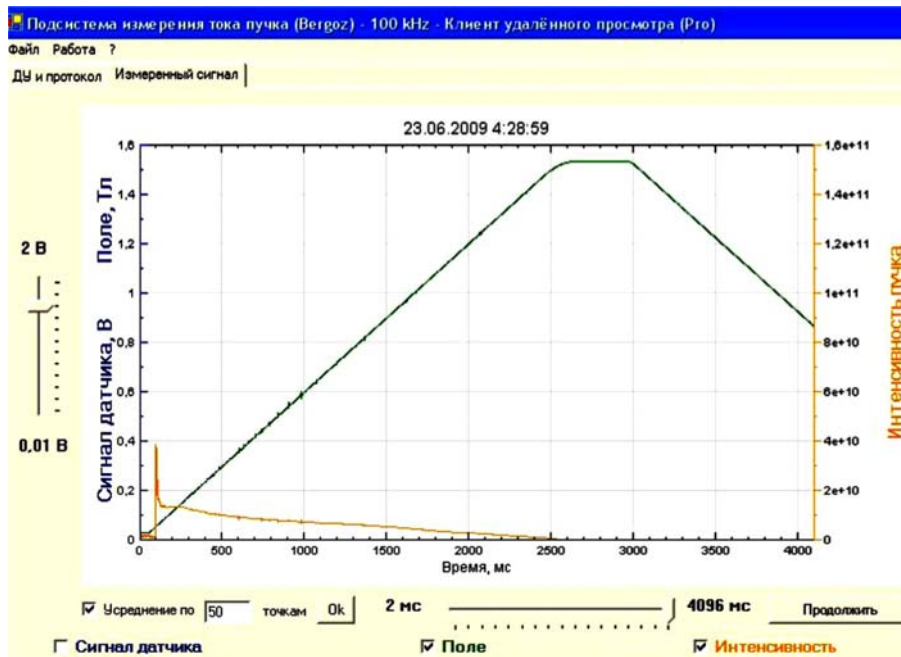


Рис. 7. Испытание систем защиты и электропитания на поле 15 кГц (4,4 кА)

5. ИСПЫТАНИЯ МАКЕТА ДАТЧИКА ПЕРЕХОДА

Испытания проводились на элементе СДП2-1-3. Новый датчик был подключен к магнитным элементам 3М4В–3М4Г. Цель испытаний — проверить правильность концепции обработки сигнала, отсутствие принципиальных ошибок в схемотехническом построении датчика и минимальную частоту оцифровки входного сигнала, при которой возможен надежный визуальный контроль формы сигнала разба-

ланса, а также испытать тракт передачи информации по шине стандарта CAN.

В цикле производился вывод информации на компьютер в реальном времени. Частота дискретизации 62,5 Гц (16 мс). В процессе эксперимента оцифрованный сигнал записывался в файл.

На рис. 8,9 показана последовательность операций по тестированию датчика.



Рис. 8. Форма сигнала со сбалансированного датчика перехода



Рис. 9. Сигнал после некоторого разбаланса измерительного моста датчика

Вся шкала по вертикальной оси приведенных рисунков составляет 3,3 В. Таким образом, амплитуда положительной полуволны сигнала по вертикальной оси составляет около 0,5 В, т.е. чуть больше амплитуды порога срабатывания (0,47 В). При этом хорошо видна форма сигнала. Никаких наводок, искажений и т.п. формы сигнала не обнаружено.

Таким образом, испытания показали, что данная конструкция датчика вполне работоспособна

и может обеспечить визуальный контроль формы сигнала.

Следует учесть, что в окончательной реализации датчика период дискретизации планировался от 500 мкс до 5 мс. Испытания показали, что сокращать период оцифровки менее 5 мс нецелесообразно, так как даже при 16 мс форма сигнала прекрасно анализируется. При этом экономится внутренняя память датчика, что ведет к его удешевлению.

6. ТЕСТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ТОКОВ В ЭЛЕМЕНТАХ МАГНИТНОЙ ОПТИКИ НА ВЫВЕДЕННЫХ ПУЧКАХ

Указанная система предназначена для осуществления персоналом ускорительных служб и физических экспериментов оперативного контроля и протоколирования величин токов магнитных элементов каналов формирования и транспортировки выведенных пучков, а также других медленно меняющихся сигналов. Работы по интеграции электронных компонент, созданию и совершенствованию программного обеспечения проводились с конца 2008 г.

Сбор данных в системе реализован на основе PCI-платы L-761 (фирма «Л-Кард»), позволяющей проводить последовательную оцифровку при помощи 14-разрядного АЦП до 32 сигналов со скоростью до 125000 выборок в секунду. Электронная часть системы включает также блоки электроники в стандарте КАМАК на 24 канала для предварительной обработки аналоговых сигналов. Источниками сигналов о токах являются сигналы токовых трансформаторов, расположенных в технологических помещениях в корпусах 1Б и 205, передающиеся на пульт

управления в корпусе 205 по многожильным телефонным кабелям. Непосредственно на входы измерительной платы может быть подано до восьми сигналов (рис. 10).

В настоящее время пользовательская компонента программного обеспечения (ПО) обеспечивает следующие возможности:

- отображение в удобной табличной форме средних значений сигналов и их вариаций (нестабильность) по серии измерений в цикле ускорителя,
- контроль отклонения среднего от заданного значения и превышение заданного уровня нестабильности,
- запись/загрузка конкретного режима (таблицы),
- ведение протокола, т.е. последовательная запись в каждом цикле измеренных средних и вариаций,
- графическое отображение измеренной в цикле серии (графики изменения сигнала в цикле) во временном и частотном представлении,
- сохранение графических экранов.

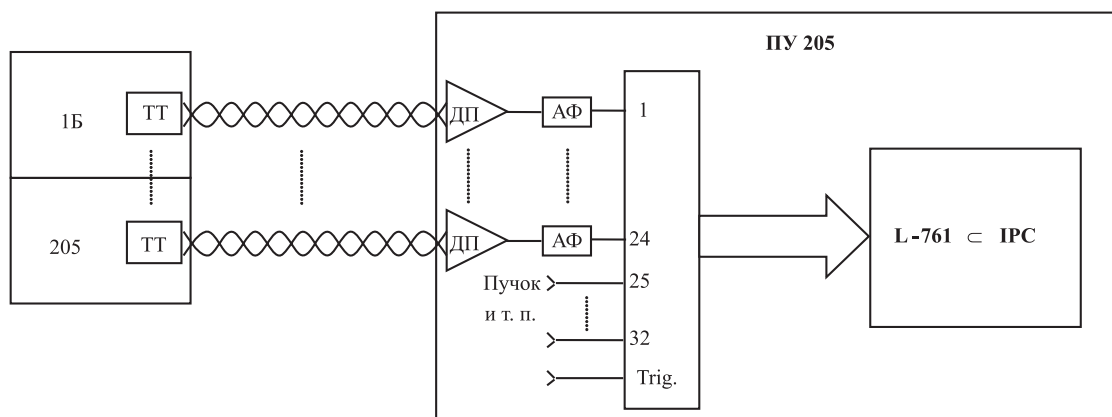


Рис. 10. Условная схема системы: ТТ — токовые трансформаторы, ДП — дифференциальный приемник, АФ — активный фильтр нижних частот 2-го порядка ($f_{cp} \cong 30$ Гц)

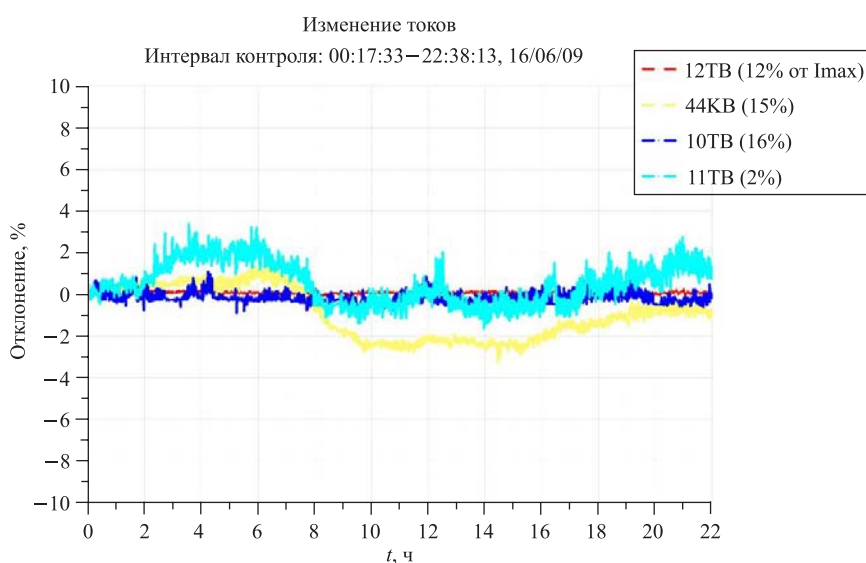


Рис. 11. Изменение токов магнитных элементов начальной части канала транспортировки выведенного пучка. Режим соответствует полю дипольных магнитов ускорителя 3234 Гс (энергия дейтронов $\cong 0,5$ ГэВ/нукл.)

В режиме непрерывной работы система испытана в период с 12 по 23 июня 2009 г. и продемонстрировала стабильное функционирование: за указанный период «зависаний» или каких-либо других негативных проявлений ПО не было зафиксировано.

Во время работ на выведенном пучке была проведена запись нескольких протоколов работы элементов головной части канала транспортировки выведенного пучка длительностью до суток. Контролировались элементы/источники: ВКМ/12ТВ, 1К100/49КВ, 2К100/50КВ, 3К100/44КВ, 4К100/45КВ, 4СП12А/10ТВ, 4СП94/11ТВ, 12К200/46КВ и 13К200/47КВ. Помимо перечисленных элементов рабочий вариант коммутации обеспе-

чивал также контроль 1К200/51КВ, 2К200/52КВ, 5СП12А/80ТВ, 3К200/55КВ, 4К200/56КВ, 5К200/75КВ, 6К200/58КВ, 2СП40/86ТВ на канале ВП-1 и 4СП94/76ТВ, 1К100/61КВ, 2К100/62КВ, 4СП12А/66КВ, 4СП12А/69КВ, 1К100/63КВ, 2К100/64КВ на канале 4В, которые в данном сеансе не включались.

Уже по данным пробным измерениям (рис. 11) видно, что для эффективного проведения физических экспериментов на выведенном пучке, критичных к его параметрам, требуется существенная модернизация системы питания каналов транспортировки выведенных пучков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье подробно описаны только некоторые основные результаты сеанса. Практически по всем основным системам нуклотрона проводятся

работы по их модернизации с максимально напряженным графиком, ориентированным на завершение в 2010 г.

В этом сеансе была введена в эксплуатацию первая очередь системы автоматизированного управления вакуумным оборудованием пучковой камеры нуклотрона (рис. 12), созданная в коллаборации с нашими чешскими коллегами (фирмами «Вакуум-Прага» и «Фотон»).

В течение 2009 г. велась реконструкция водозабора: установлен новый, современный самоочищающийся фильтр на две питающих линии водоохлаждения технологических систем ускорительного комплекса (вакуумная система кольца нуклотрона, компрессорный цех, КГУ). Новая система фильтрации на водозаборной станции (рис. 13) прошла испытание в условиях паводка в апреле 2009 г. и показала отличный результат. Следующий этап — это полное переоснащение водозабора подобными фильтрами на все коммуникации водоохлаждения технической площадки ЛФВЭ. Кроме того, была создана и

опробована в условиях паводка система грунтососов, предназначенная для удаления песка из приемного колодца. По контракту с Болгарией осенью 2009 г. должна быть получена и установлена АСУ системой водоохлаждения ускорительного комплекса: датчики давления и температуры, дистанционное управление насосами, задвижками, детектирование течей.

В завершающей стадии находятся работы по модернизации системы питания электростатического септума (ЭСС) (рис. 14), имеющие целью улучшение эксплуатационных характеристик и увеличение напряжения до 200 кВ, что позволит эффективно осуществлять вывод ионного пучка с энергией, близкой к проектной (сейчас напряжение ограничено величиной 110–120 кВ). В ходе подготовки к сеансу проводились ее высоковольтные испытания.

До окончания проекта «Нуклотрон-М» решено провести еще два сеанса: один — осенью 2009 г., второй — в первой половине 2010 г.



Рис. 12. Участники создания и ввода в эксплуатацию АСУ вакуумной системой нуклотрона



Рис. 13. Новый фильтр на водозаборной станции



Рис. 14. Слева — существующий высоковольтный генератор источника питания ЭСС, справа — новая умножающая колонна с напряжением до 200 кВ

ЛИТЕРАТУРА

1. *Агапов Н.Н.* Криогенные технологии в сверхпроводящем ускорителе релятивистских ядер — нуклотроне // ЭЧАЯ. 1999. Т. 30, вып. 3. С. 760.
2. *Агапов Н.Н., Алфеев А.В., Андреев В.А. и др.* Ход реализации проекта «Нуклотрон-М» (по итогам сеансов № 37, 38). Сообщение ОИЯИ Р9-2009-38. Дубна, 2009.
3. *Волков В.И., Елисеев А.В., Иссинский И.Б., Коваленко А.Д.* Моделирование адиабатического захвата пучка нуклотрона в режим ускорения. Сообщение ОИЯИ Р9-2003-154. Дубна, 2003.

Получено 2 сентября 2009 г.