

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
Дубна

P9-2011-72

ИТОГИ 42-ГО И 43-ГО СЕАНСОВ НУКЛОТРОНА

2011

Аверичев А. С., Агапов Н. Н., Алфеев А. В., Андреев В. А., Базанов А. М.,
Балдин А. А., Батин В. И., Блинов Н. А., Бровко О. И., Бутенко А. В.,
Василишин Б. В., Вишневецкий А. В., Волков В. И., Галимов А. Р., Говоров А. И.,
Горбачев Е. В., 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.,
Кудашкин И. В., Куликов И. И., Кунченко О. А., Лебедев Н. И., Левтеров К. А.,
Мешков И. Н., Михайлов В. А., Мончинский В. А., Нестеров А. В., Никитаев П. И.,
Осипенков А. Л., Пиляр Н. В., Рамздорф А. Ю., 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., Трубников Г. В., Тузиков А. В., Филиппов А. В.,
Филиппов Н. А., Ходжибагиян Г. Г., Царенков А. П., Швидкий Д. С.
Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Гешков И.

Институт ядерных исследований и ядерной энергетики БАН, София, Болгария

Ондриш Л., Крушински Д.

Институт проблем измерений САН, Братислава, Словакия

Герек И., Юрнечка А.

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

Основной задачей 42-го сеанса работы нуклотрона (декабрь 2010 г.), завершившего проект «Нуклотрон-М», являлся ввод в эксплуатацию новой системы электропитания и защиты структурных магнитов и линз. В результате была продемонстрирована надежная работа магнитной системы при проектном значении поля магнитов, равном 2 Тл. В ходе 43-го сеанса, проведенного уже в рамках нового проекта «Нуклотрон-NICA» в период с 21 февраля по 23 марта 2011 г., продолжались работы по вводу в эксплуатацию новой системы электропитания и защиты. Обеспечено ускорение и медленный вывод пучка дейтронов до энергии примерно 3 ГэВ/нукл. Около 300 часов ускоритель отработал по программе физических экспериментов. В данной статье приводятся основные результаты ускорительных смен сеансов.

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

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2011

The main goal of the 42nd Nuclotron run (December 2010), completing the Nuclotron-M project, was commissioning of a new power supply and protection system for the structural magnets and lenses. As a result, the stable and safe work of the magnetic system was demonstrated at a design magnet field equal to 2 T. During the 43rd run, performed in the framework of the new project «Nuclotron-NICA», commissioning of the power supply and protection system was prolonged. Acceleration and slow extraction of the deuteron beam was provided up to an energy of about 3 GeV/u. The accelerator worked for the physical research program during about 300 hours. The results of the machine development shifts are presented in this article.

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, 2011

Введение

Основная задача 42-го, «технологического», сеанса, проведенного с 10 по 30 декабря 2010 г., — ввод в эксплуатацию новой системы электропитания и защиты структурных магнитов и линз. Его основной результат — демонстрация надежной работы магнитной системы при проектном значении поля магнитов, равном 2 Тл, что являлось одной из основных задач проекта «Нуклотрон-М». Кроме того, была испытана цифровая система измерения положения равновесной орбиты, введены в опытную эксплуатацию новые источники питания корректирующих магнитов. При работе с циклом поля в этом сеансе все структурные магниты (и диполи, и квадруполи) питались одним источником тока, при этом возможность оптимизации рабочей точки ускорителя отсутствовала, и устойчивый режим ускорения не был реализован. В завершение сеанса, в качестве резервного, был отработан режим ускорения с регулировкой рабочей точки с помощью семейства квадруполей, предназначенного для медленного вывода пучка. В этом режиме пучок дейтронов был ускорен примерно до 1,3 ГэВ/нукл.

В 2010 г. проект «Нуклотрон-М» был официально завершен, и 43-й сеанс (с 21 февраля по 23 марта 2011 г.) проводился уже в рамках нового проекта «Нуклотрон-НИСА». Примерно 40% времени составили работы по программе физических экспериментов. В ходе ускорительных смен сеанса продолжались работы по вводу в эксплуатацию новой системы питания и защиты структурных магнитов нуклотрона. Обеспечено ускорение и медленный вывод пучка дейтронов до энергии примерно 3 ГэВ/нукл. Проводились работы по тренировке электростатического септума, напряжение на котором было доведено примерно до 120 кВ (на стенде новый источник высоковольтного питания был испытан до напряжения 200 кВ). Продолжались работы по коррекции орбиты пучка, в том числе по реализации «бампа» орбиты в

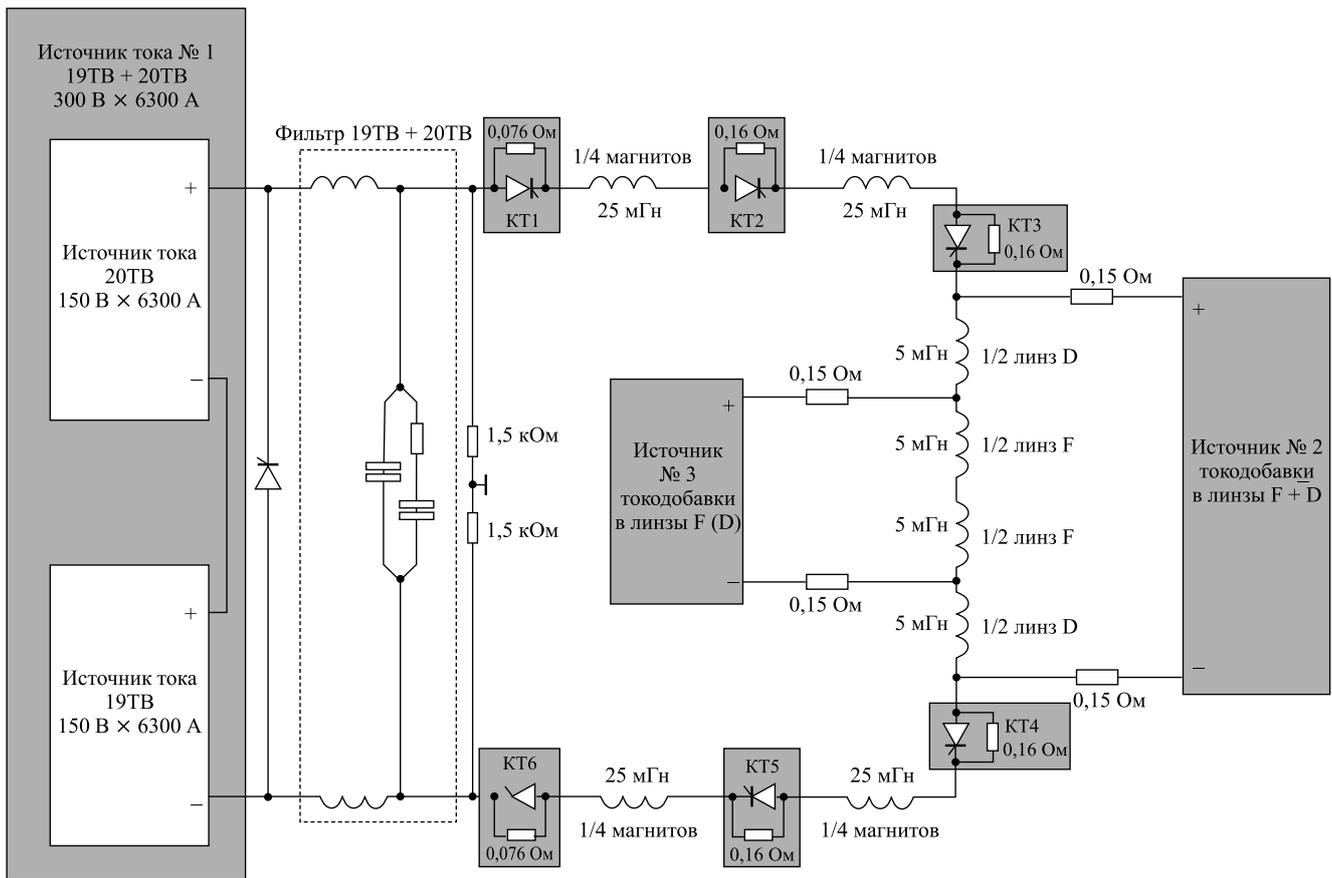
районе электростатического септума. Интенсивность пучка, захваченного в режим ускорения и ускоренного до энергии, соответствующей полю дипольных магнитов 2 кГс, была доведена примерно до $5 \cdot 10^{10}$ ионов.

1. Создание новой системы электропитания и защиты структурных магнитов

Основной задачей развития систем питания и защиты структурных магнитов и линз нуклотрона являлось обеспечение надежной и длительной работы с магнитным полем до 2 Тл и реализация возможности оптимизации рабочей точки ускорителя.

При подготовке проекта «Нуклотрон-М» [1] была разработана концепция модернизации системы электропитания структурных дипольных и квадрупольных магнитов, основанная на принципе общей связи этих структурных элементов кольца нуклотрона, источников питания 19ТВ и 20ТВ, ключей эвакуации энергии КТ1...КТ6 и системы датчиков перехода (рис. 1.1). Принципиальная возможность такого подхода основана на том, что при интегральных значениях магнитного поля в диполях и градиента в квадруполях, заданных на этапе проектирования нуклотрона, номинальные токи их питания отличаются не более чем на $\pm 10\%$ в требуемом диапазоне изменения бетатронных частот. Поэтому все структурные магниты могут быть соединены последовательно и запитаны одним мощным источником. При этом регулировка тока в квадрупольных магнитах осуществляется двумя дополнительными источниками (разбаланса) малой мощности.

Практическая реализация этой схемы предполагала модернизацию существующих источников 19ТВ и 20ТВ, разработку и создание двух новых источников разбаланса для фокусирующих и дефокусирующих линз, демонтаж старых кабельных



КТ1...КТ6 — ключи тиристорные № 1...6 эвакуации энергии

Рис. 1.1. Схема электропитания при последовательном соединении структурных дипольных магнитов, фокусирующих (F) и дефокусирующих (D) линз нуклотрона

трасс и монтаж нескольких километров новых. Для повышения надежности системы защиты необходимо было разработать и создать новые ключи эвакуации энергии.

Тестирование возможностей новой схемы электропитания структурных магнитов и линз нуклотрона было проведено в ходе 37-го сеанса [2]. При этом в качестве основного использовался источник 20ТВ, а источник 19ТВ обеспечивал добавку тока в цепи квадрупольных линз. Была продемонстрирована устойчивая работа схемы при малых уровнях тока, в результате были уточнены требования к динамическим характеристикам вновь разрабатываемых источников разбаланса для линз.

На основании анализа результатов 37-го сеанса было принято окончательное решение о реализации новой схемы электропитания и конкретизирована программа работ. С конца 2008 г. были начаты работы по демонтажу старых кабельных трасс и монтажу кабельных трасс для новой схемы питания (рис. 1.2).

Все технические решения, положенные в основу новой системы электропитания, последовательно проверялись в ходе сеансов нуклотрона. В ходе

39-го сеанса было проведено комплексное испытание систем защиты и электропитания при работе в цикле с полем на столе величиной 1,5 Тл [3]. При этом было осуществлено ускорение пучка дейтронов до энергии примерно 3,8 ГэВ/нукл. В 41-м сеансе было проведено новое испытание, в результате которого в течение нескольких сотен циклов магнитная система отработала при максимальном поле 1,8 Тл [4–6].

Основной объем монтажных работ по созданию новой схемы электропитания и защиты был выполнен в 2010 г. по завершении 41-го сеанса. В цокольном этаже здания синхрофазотрона было подготовлено место для размещения 6 ключей эвакуации энергии с удаленным управлением. Принципиальная схема и основные элементы ключа эвакуации энергии приведены на рис. 1.3. После тестирования тиристоров и резисторов новых ключей были сформированы сборки с допустимым разбросом параметров, произведена сборка ключей (рис. 1.4), смонтирована и протестирована система управления ключами. К началу сеанса были проложены необходимые кабельные трассы, схема собрана, основной источник питания, соз-

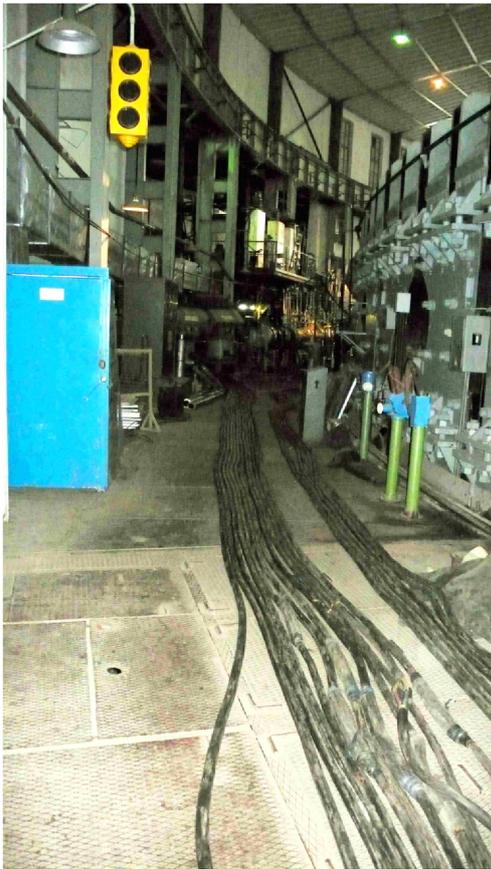
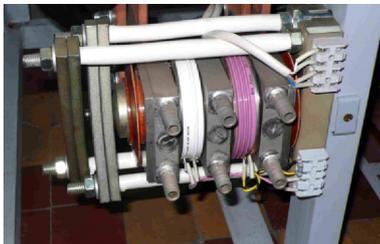


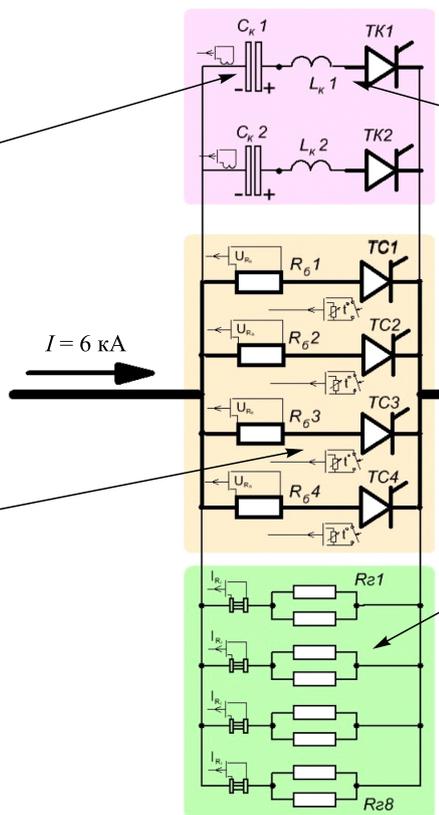
Рис. 1.2. Монтаж кабельных трасс в здании синхрофазотрона



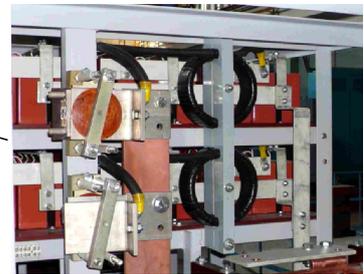
Конденсаторная батарея



Силовая сборка — тиристор ТБ173-2000 и резистор-шунт РКШ173-0,0005



Принципиальная схема



Коммутационный тиристор ТК и L_k



Резистор гашения поля $R_{г1...4}$

Рис. 1.3. Ключ эвакуации энергии



Рис. 1.4. Монтаж ключей эвакуации энергии в специально подготовленном помещении в цокольном этаже здания синхрофазотрона

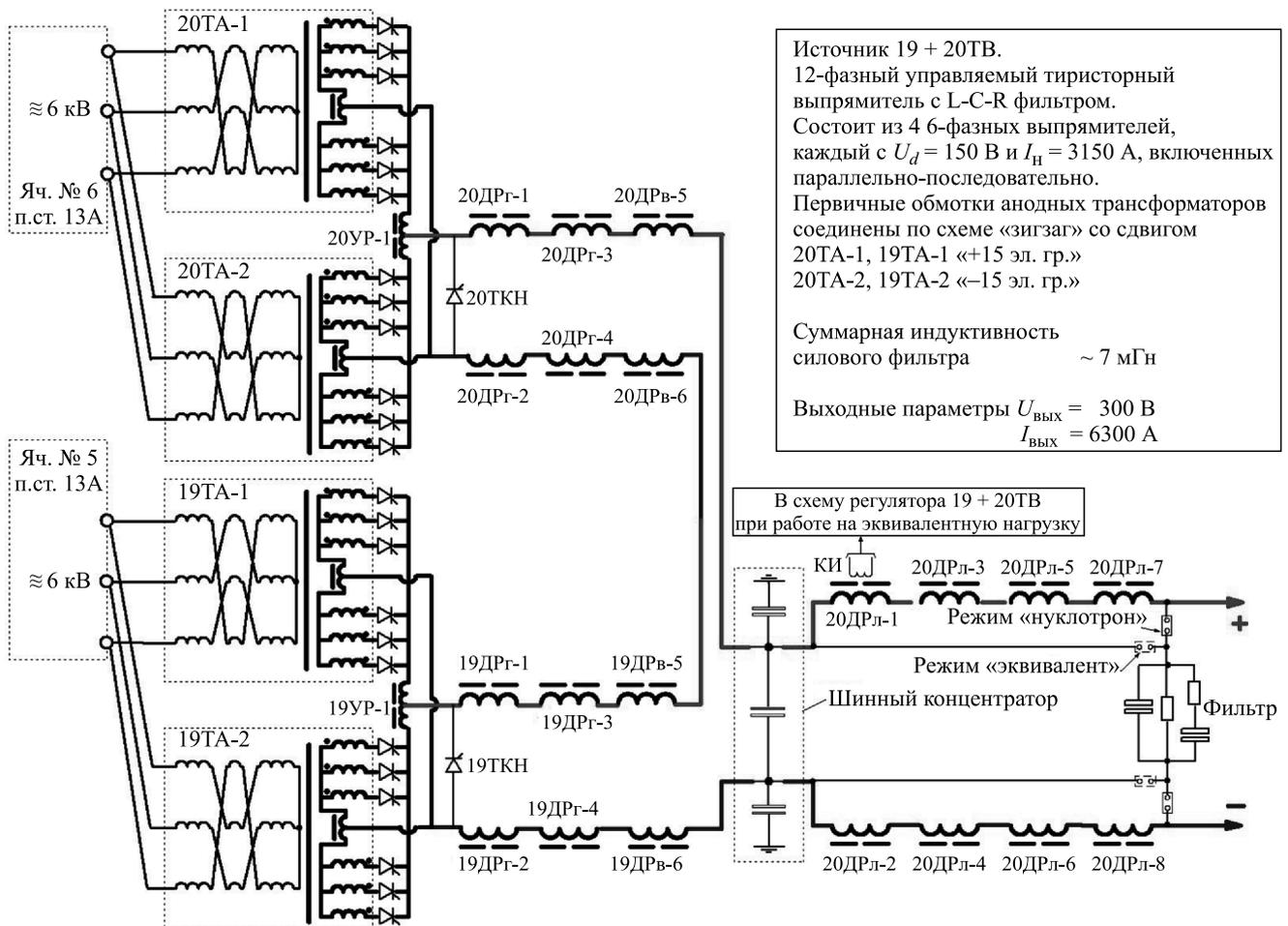


Рис. 1.5. Принципиальная схема и основные параметры основного источника питания



Рис. 1.6. Тиристорный выпрямитель и элементы фильтра источника 20ТВ

данный на основе доработанных источников 19ТВ и 20ТВ (рис. 1.5, 1.6), и система эвакуации энергии были протестированы на эквивалентной нагрузке.

Система электропитания и защиты структурных магнитов и линз, подготовленная к началу декабря, кроме основного источника включала в себя источник токоотбора квадрупольных линз (источник №2 на рис. 1.1), выполненный в макетном варианте. Испытание этой системы было основной задачей 42-го сеанса работы нуклотрона, а критерием успешности, в соответствии с задачами проекта «Нуклотрон-М», являлось обеспечение устойчивой работы магнитной системы при максимальной проектной величине поля дипольных магнитов, составляющей 2 Тл.

В начале сеанса источники питания были протестированы в цикле с малым уровнем поля. На основе полученных результатов основной источник был оптимизирован для надежной работы при токе 6,3 кА, соответствующем проектному полю нуклотрона. Источник разбаланса (токоотбора) квадрупольных линз был протестирован, но в дальнейшем в сеансе не использовался. Результаты его тестирования были использованы для доработки схемы при подготовке к 43-му сеансу.

Работы по оптимизации режимов основного источника проводились параллельно с вводом в эксплуатацию новой системы коррекции равновесной орбиты и вновь установленных устройств и систем

диагностики пучка (см. разд. 2, 3). При этом использовался отработанный в ходе 41-го сеанса режим работы ускорителя с питанием структурных магнитов и линз от источников постоянного тока малой мощности. Ток в структурных магнитах, соответствующий полю инжекции (примерно 80 А), возбуждался источником стабилизированного тока фирмы «Glassman», а второй аналогичный источник использовался для питания структурных линз. В будущем планируется изготовить специализированные источники тока и использовать этот режим как штатный при тестировании устройств диагностики и измерении параметров ускорителя.

29 декабря 2010 г. основной источник питания и система защиты были последовательно протестированы в циклах с полем на столе 1,4, 1,6 и 1,8 Тл. Все системы работали штатным образом, после чего поле на столе было увеличено до 2 Тл. В этом эксперименте темп роста и спада поля составлял 0,6 Тл/с, что соответствовало длительности активной части цикла 7 с, при периоде следования циклов 12 с. Обеспечение надежной работы магнитной системы при проектном уровне поля явилось прямым подтверждением правильности основных технических решений, положенных в основу новой системы электропитания и защиты.

В этом эксперименте не менее важной задачей было исследование работы систем измерения и формирования полевых функций, а также характе-



Рис. 1.7. Диаграмма цикла с полем дипольных магнитов на столе 2 Тл. Кривая 2 — опорная функция, кривые 3 и 1 — измеренные значения поля магнитов и градиента квадрупольных линз соответственно. Кривая 4 — отношение градиента линз к полю дипольных магнитов (G/B). 42-й сеанс

ра насыщения железных сердечников магнитов и линз при высоких уровнях поля. Диаграмма цикла при максимальной величине магнитного поля показана на рис. 1.7. Для динамики поперечного движения частиц принципиальное значение имеет поведение во времени отношения градиента линз к полю дипольных магнитов — именно эта величина определяет положение рабочей точки ускорителя в процессе ускорения пучка. Для ускорения пучка без потерь частиц заданное значение должно быть выдержано с относительной погрешностью не больше чем 10^{-3} .

В проведенном эксперименте отношение G/B (при линейной зависимости поля от тока во всех элементах) должно было бы оставаться постоянным в течение всего цикла изменения поля, так как и линзы, и магниты питались одним и тем же током. Однако при малых уровнях поля (из-за разной остаточной намагниченности) виден резкий скачок G/B , затем участок линейного спада (возникающий из-за погрешности таймеров, формирующих B - и G -серии). Далее, начиная с поля дипольных магнитов примерно 1,2 Тл, зависимость становится существенно нелинейной, что свидетельствует о разном характере насыщения сердеч-

ников дипольных магнитов и линз. В таких условиях обеспечение стабильного положения рабочей точки при больших уровнях поля возможно только при схеме регулирования источников разбаланса линз по измеренному значению поля и градиентов.

В ходе подготовки к 43-ему сеансу макет источника разбаланса линз и магнитов был доработан. Параметры уравнивающего дросселя источника 20ТВ (20УР-1 на рис. 1.5) не позволяли обеспечить требуемую стабильность работы при малых уровнях поля, поэтому в ходе сеанса в качестве основного источника использовался только источник 19ТВ, при этом темп роста поля был ограничен величиной 0,3 Тл/с. К началу 43-го сеанса была реализована схема управления источниками, показанная на рис. 1.8.

Принцип ее действия следующий.

Оператор задает зависимость поля дипольных магнитов от времени в виде последовательности линейных участков, сопряженных параболическими переходами. На ее основе генератор функций формирует зависимость $B_0(t)$, которая является опорным сигналом для регулятора основного источника. Она же передается в систему отображения полевых функций и выводится на экран

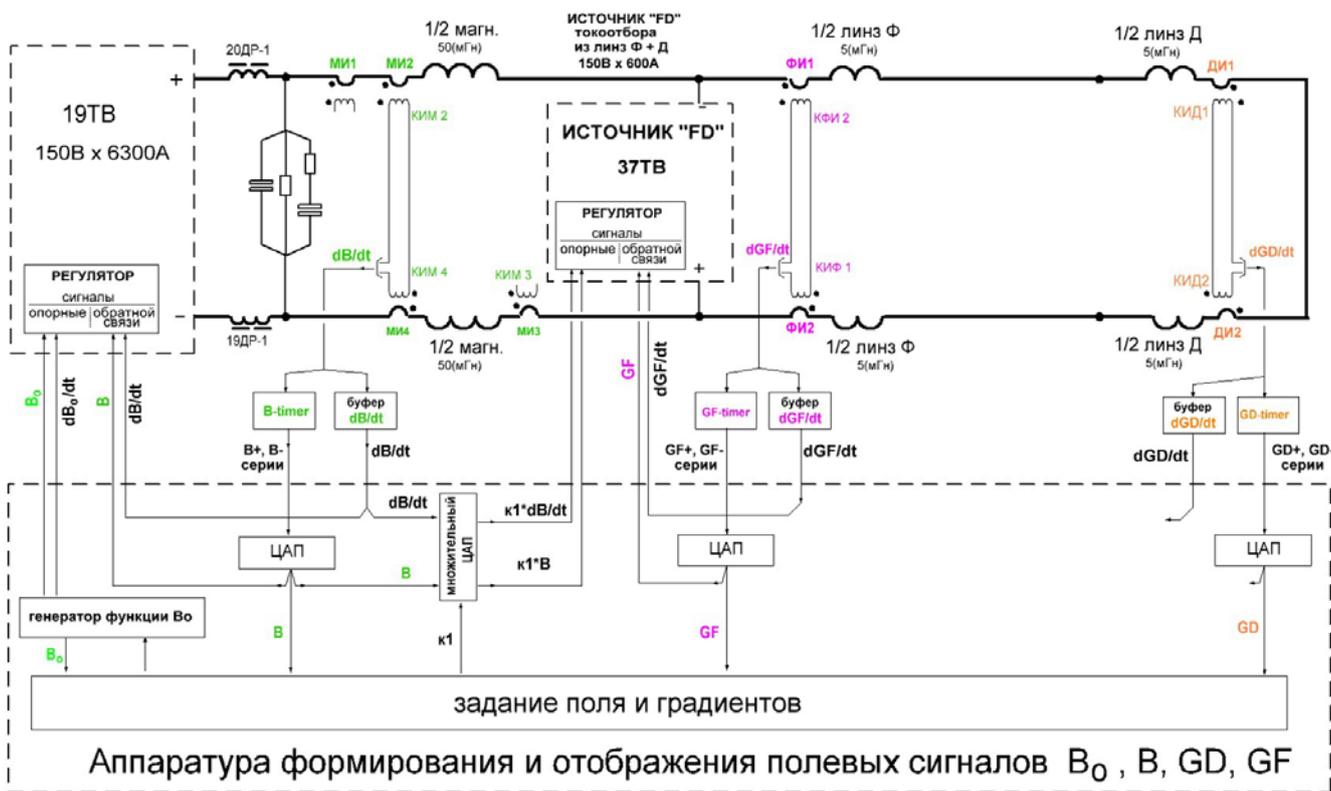


Рис. 1.8. Структурная схема регулирования источника разбаланса по полю

дисплея. Сигналы с катушек, расположенных в дипольных магнитах измерительного периода, пропорциональны производной поля по времени. С помощью B -таймера они преобразуются в так называемую B -серию и оцифровываются. Сигнал B -серии поступает в 18-разрядный цифроаналоговый преобразователь (ЦАП), где формируется гальванически развязанный сигнал B , пропорциональный полю, который, в свою очередь, используется в качестве сигнала обратной связи основного источника и для формирования опорного сигнала источника разбаланса. Кроме того, B -серия передается системе отображения полевых функций и выводится на дисплей в качестве измеренной величины поля. Она же используется для управления задающим генератором ускоряющей ВЧ-системы (на схеме для простоты не указано).

Для управления рабочей точкой ускорителя оператор задает зависимость от времени отношения градиента линз к полю дипольных магнитов (k_1 на рис. 1.8). Опорный сигнал для регулятора источника разбаланса формируется многоканальным ЦАП умножением заданного коэффициента на сигнал B -серии. Сигналы с катушек, расположенных на некотором расстоянии от оси фокусирующих линз измерительного периода (пропорциональные производной градиента по времени), с помощью GF -таймера преобразуются в GF -серию. Сигнал GF -

серии преобразуется аналогично сигналу B -серии, используется в качестве сигнала обратной связи в регуляторе источника разбаланса и передается системе отображения для вывода измеренного значения градиента и отношения градиента к полю.

Аналогичным образом планируется реализовать схему для управления источником разбаланса между линзами F и D (источник № 3 на рис. 1.1).

В начале 43-го сеанса схема регулирования по полю была протестирована, были измерены спектры шумов сигналов B - и GF -серий, получены необходимые данные для оптимизации схемы источника при подготовке к следующему сеансу. После этого источник разбаланса был переведен в режим управления по току, при котором сигнал обратной связи подавался с шунтового сопротивления в выходной цепи источника. Этот режим обеспечивал стабильное ускорение пучка дейтронов и медленный вывод до энергии примерно 3 ГэВ/нукл.

Для завершения работ по модернизации системы электропитания предполагается ввод в эксплуатацию еще одного источника питания линз (для гибкой настройки рабочей точки ускорителя), обеспечение требуемого качества медленного вывода во всем диапазоне энергий, вплоть до максимальной проектной. Эти задачи планируется решить до конца 2012 г.

2. Системы измерения и коррекции равновесной орбиты

К началу 42-го сеанса были завершены работы по модернизации системы оперативного измерения положения орбиты и разработано необходимое программное обеспечение. Новая цифровая система обладает хорошей помехозащищенностью, позволяет контролировать положение орбиты в течение всего процесса ускорения, измерять частоты бетатронных колебаний. В течение 42-го сеанса эта система проходила тестирование в параллель с существовавшей ранее аналоговой системой и использовалась для настройки оптимальной циркуляции пучка на столе инжекции. Пример измененного положения орбиты приведен на рис. 2.1.

Для проведения коррекции равновесной орбиты было необходимо расширение диапазона регулируемых токов в корректорах, кроме того, существовавшие источники питания корректоров не обеспечивали стабильного положения орбиты в процессе ускорения (измерение положения орбиты в разных точках цикла было проведено в ходе 38-го сеанса). Для решения этих проблем совместно с Электротехническим исследовательским и проектным институтом (EVPU, Нова Дубница, Словакия) были разработаны новые источники питания корректоров. Опытный образец источника прошел «холодные» испытания на стенде, был установлен на кольце нуклотрона и испытан в ходе 40-го сеанса. На основе результатов испытаний в конструкцию были внесены необходимые измене-

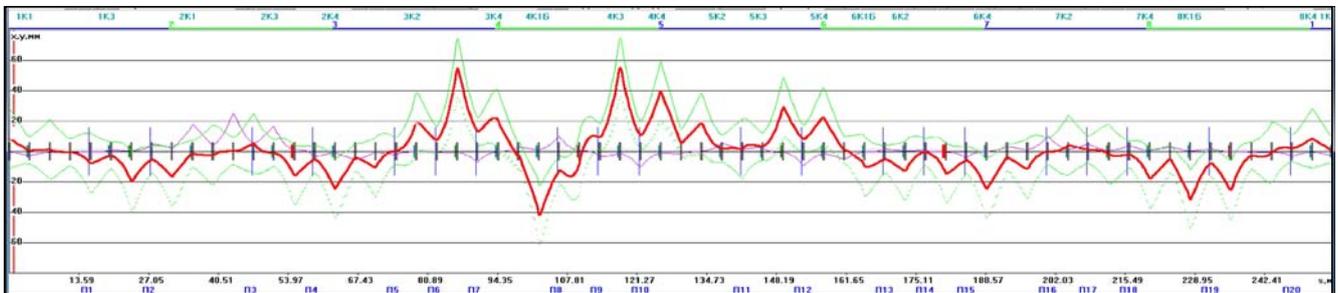


Рис. 2.1. Положение орбиты пучка в горизонтальной плоскости при энергии инжекции, 42-й сеанс

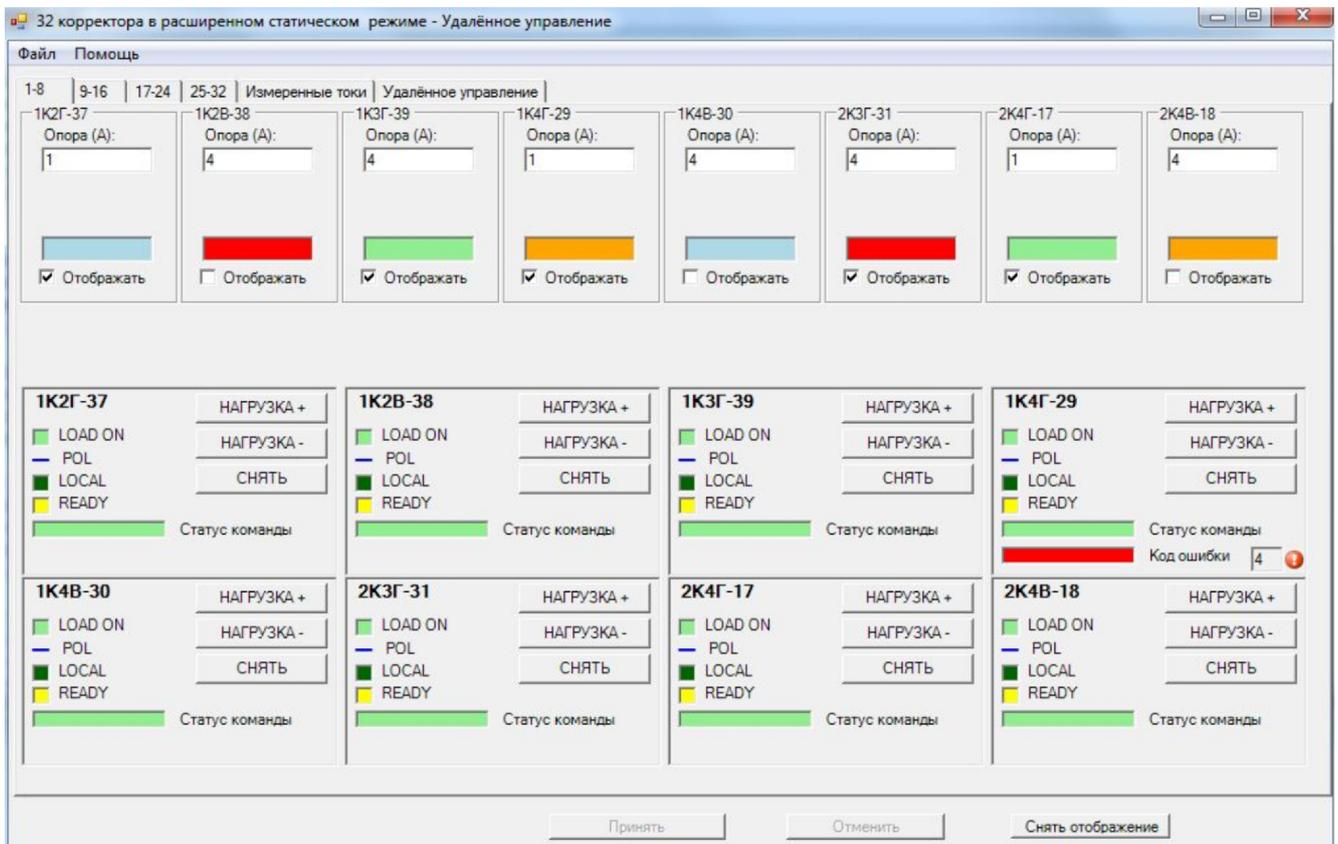
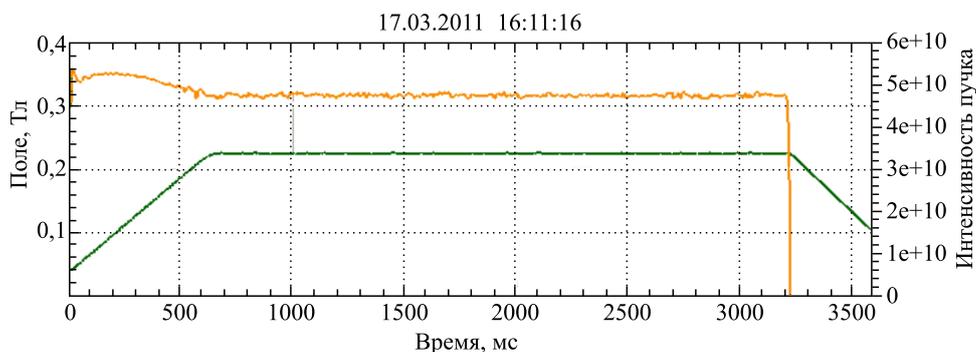


Рис. 2.2. Окно системы дистанционного контроля и управления источниками питания корректоров в статическом режиме работы

Рис. 2.3. Интенсивность пучка дейтронов в процессе ускорения. Поле на столе 2 кГс, интенсивность на столе $\sim 5 \cdot 10^{10}$ ионов. 43-й сеанс



ния, первые 4 серийных источника были испытаны в 41-м сеансе [4]. К началу 42-го сеанса была создана новая система коррекции орбиты, включающая в себя 32 источника питания и систему управления, позволяющую дистанционно задавать и контролировать полярность, ток и параметры цикла источников (рис. 2.2).

Поэтапный ввод в эксплуатацию новой системы коррекции был начат в 42-м сеансе. Работы проводились при энергии инжекции, в режиме питания структурных магнитов и линз от источников постоянного тока. Для удобства измерений длительность инжекции составляла 4 мкс, что соответствует примерно половине оборота пучка в нуклотроне. Было показано, что использование новой системы коррекции позволяет существенно уменьшить потери частиц при инжекции.

В 43-м сеансе продолжались работы по коррекции орбиты пучка на столе инжекции и при инжекции в растущее поле. В результате интенсивность пучка дейтронов, захваченного в режим ускорения и ускоренного до энергии, соответствующей полю дипольных магнитов 2 кГс, была доведена примерно до $5 \cdot 10^{10}$ ионов (рис. 2.3).

В 43-м сеансе (как и в 42-м) система коррекции использовалась в статическом режиме, т.е. токи корректирующих магнитов оставались постоянными в течение цикла основного поля. С помощью новой системы измерения была исследована эволюция орбиты пучка в процессе ускорения (рис. 2.4). Из рис. 2.4 видно, что корректирующее действие полностью вырождается при достижении величины основного поля, примерно равной 800 Гс, после чего положение орбиты остается практически неизменным. Размер пучка при этом затухает всего примерно в 1,5 раза, и деформация орбиты, происходящая в первые 100–200 мс, сопровождается заметными потерями частиц. В 44-м сеансе планируется испытать систему коррекции в режиме с циклом поля корректоров, повторяющим по форме цикл основного поля.

Дальнейшего повышения интенсивности ускоренного пучка планируется достичь за счет его согласования при инжекции, продолжения работ по коррекции орбиты и реализации адиабатического захвата в процесс ускорения.

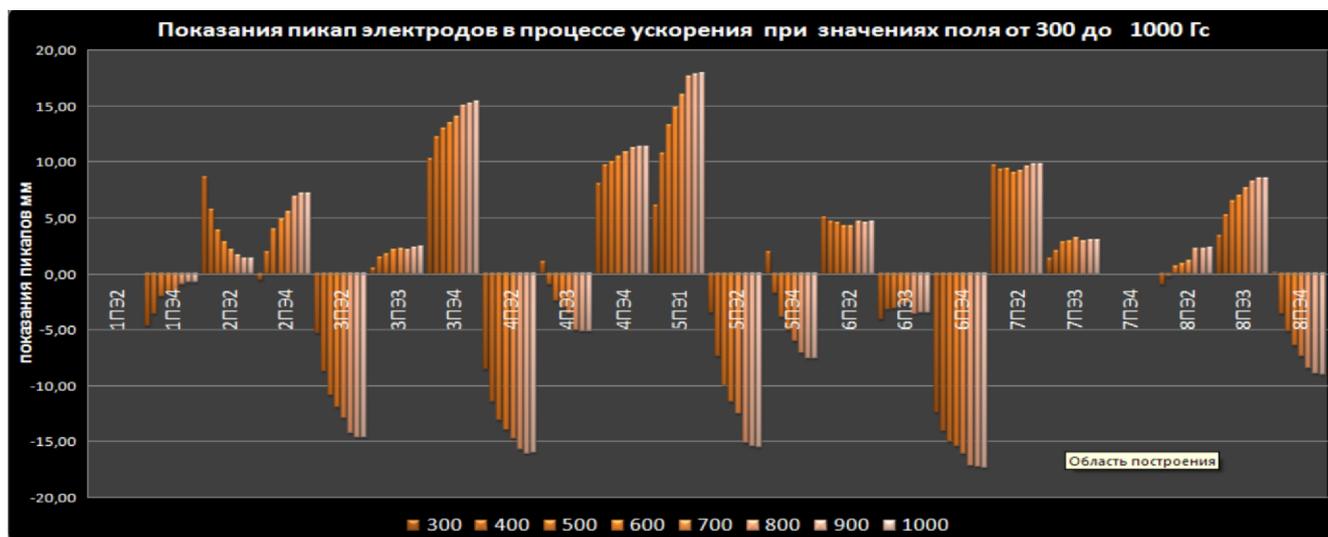


Рис. 2.4. Положение орбиты пучка в точках расположения пикап-электродов в процессе ускорения, измеренное при поле дипольных магнитов от 300 до 1000 Гс с шагом 100 Гс. 43-й сеанс

3. Развитие средств диагностики циркулирующего пучка

В 41-м сеансе, при ускорении ионов ксенона [4], интенсивность и профиль пучка измерялись с помощью детектора на основе ВЭУ, регистрирующего ионы остаточного газа. Детектор показал достаточно надежную работу, позволил настроить режим ускорения и определить время жизни ускоренного пучка на столе поля. Этот метод диагностики неразрушающего типа планируется активно использовать в рамках тяжелоионной программы нуклотрона.

С целью расширения диапазона интенсивностей измеряемого пучка и повышения пространственного разрешения по завершении 41-го сеанса были начаты работы по созданию детекторов на основе микроканальных пластин (МКП). Созданный прототип детектора (рис. 3.1, 3.2) состоит из двух МКП (шевронная сборка), расположенных на расстоянии 250 мкм. Размеры пластин 43×63 мм, диаметр каналов 15 мкм. В качестве коллектора электронных лавин используются электрически изолированные друг от друга контактные площадки (ламели) — позиционно-чувствительные аноды.

Предварительно прототип был испытан на специально разработанном стенде, где пучок ускорителя имитировался радиоактивным источником α -частиц с энергией около 4 МэВ, располагавшимся над сборкой на расстоянии 4 см. К началу 42-го сеанса прототип был установлен на теплом промежутке нуклотрона, и в ходе сеанса были проведены его испытания, в основном на циркулирующем пучке при энергии инжекции.

В 43-м сеансе работы по испытаниям и настройке детектора были продолжены в режиме

ускорения пучка. Были изучены режимы насыщения и восстановления пластин в зависимости от интенсивности циркулирующего пучка. Изучены зависимости эффективности регистрации ионов остаточного газа от режимов высоковольтного питания пластин. На рис. 3.3 показана характерная пространственно-временная структура отсчетов в условиях перегрузки детектора (каналы 7–9) от момента инжекции пучка до его «рассыпания» в конце цикла.

Были изучены предельные режимы работы детектора, намечен план работ по модернизации системы высоковольтного питания и электростатической защиты детектора от перезагрузок. Отработаны системы сбора и передачи данных с детектора в удобном для пользователя виде. Изучены шумы и наводки на детектор от ускорителя и при вводе внутренних мишеней. Изучены зависимости чувствительности детектора от напряжения питания и порогов дискриминации выходных сигналов. Исследования проводились параллельно с работами по настройке ускорителя и во время экспериментов с внутренними мишенями. На основе испытанного прототипа планируется создание эксплуатационной версии детектора с измерением профилей в двух поперечных плоскостях.

По результатам проведенной в 37-м сеансе комплексной ревизии элементов системы коррекции орбиты — пикап-станций и корректоров — было принято решение об изготовлении и установке на кольцо 8 дополнительных пикап-станций в окрестностях фокусирующих линз [2]. Первая из них, с электродами эллиптической геометрии, была изготовлена в ЦОЭП ЛФВЭ, прошла «холодные» испытания на стенде, установлена на нуклотроне и испытана в ходе 42-го, 43-го сеансов. По результатам испытаний ее конструкция дорабатывается,

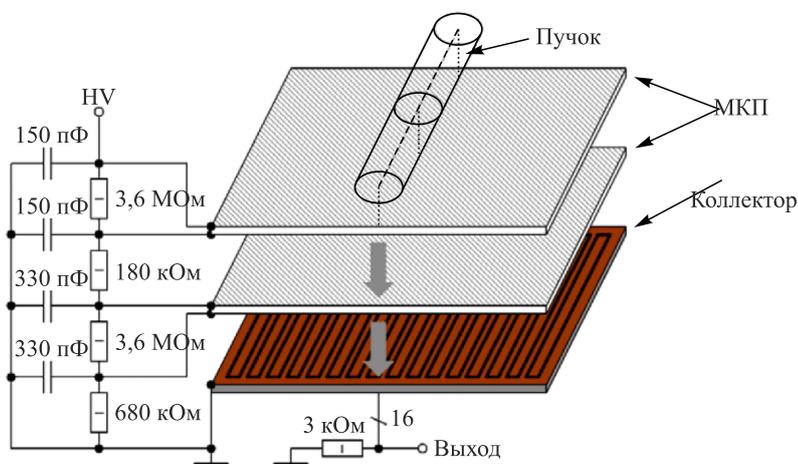


Рис. 3.1. Схема, поясняющая принцип работы координатно-чувствительного детектора на основе микроканальных пластин



Рис. 3.2. Внешний вид прототипа детектора

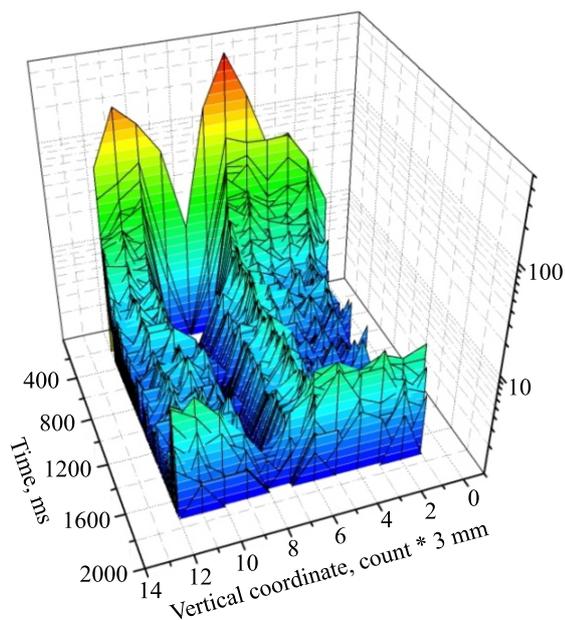


Рис. 3.3. Эволюция вертикального профиля пучка дейтронов в процессе ускорения, измеренного детектором на основе МКП. 43-й сеанс

и в ближайшее время будут изготовлены необходимые дополнительные станции. Аналогичные по конструкции пикап-станции планируется использовать в бустере комплекса NICA.

Продолжались эксперименты по измерению дробового шума пучка, циркулирующего в нукло-

троне. В 42-м сеансе они проводились при энергии инжекции при питании магнитной системы нуклотрона от источников постоянного тока, а в 43-м сеансе при энергии инжекции и в фоновом режиме в экспериментах с внутренней мишенью. В 43-м сеансе для регистрации спектра шумов использовался анализатор спектра «Rudy & Swarz», приобретенный для настройки элементов системы стохастического охлаждения, установка которых на нуклотроне запланирована к 44-му сеансу. Сигнал с одной из пикап-станций усиливался штатным предусилителем системы измерения орбиты. В режиме сгруппированного пучка пики, соответствующие частотам обращения, наблюдаются примерно до частоты 30 МГц. В качестве примера на рис. 3.4 приведен спектр дробового шума, на котором виден пик, соответствующий 10-й гармонике частоты обращения, и боковые пики, соответствующие частоте синхротронных колебаний частиц. Амплитуда ускоряющего ВЧ-напряжения при измерениях составляла примерно 8 кВ.

Эти измерения планируется продолжить при испытании пикапа и кикера системы стохастического охлаждения, изготовление которых осуществляется совместно с Исследовательским центром (Юлих, Германия) и находится в завершающей стадии.

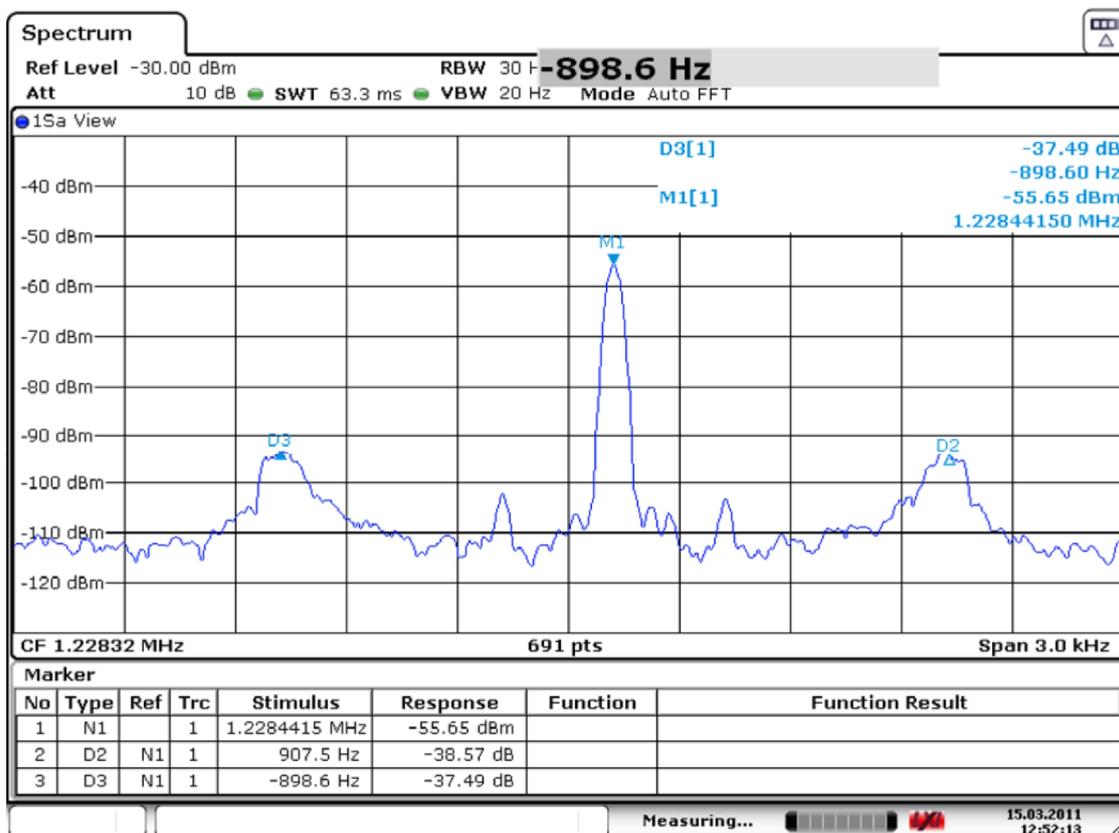


Рис. 3.4. Спектр дробового шума сгруппированного пучка дейтронов, циркулирующего при энергии инжекции при питании магнитной системы нуклотрона от источников постоянного тока. 43-й сеанс

4. Развитие диагностики выведенного пучка

В 43-м сеансе работы нуклотрона на выведенном пучке успешно испытаны новые профилометры, включающие аналоговые проволочные пропорциональные камеры (рис. 4.1) и прикамерную электронику. Аппаратура устанавливалась в районе ФЗ малого измерительного павильона в месте размещения профилометра ПИК-3Н (рис. 4.2). В 2011–2012 гг. каналы транспортировки выведен-

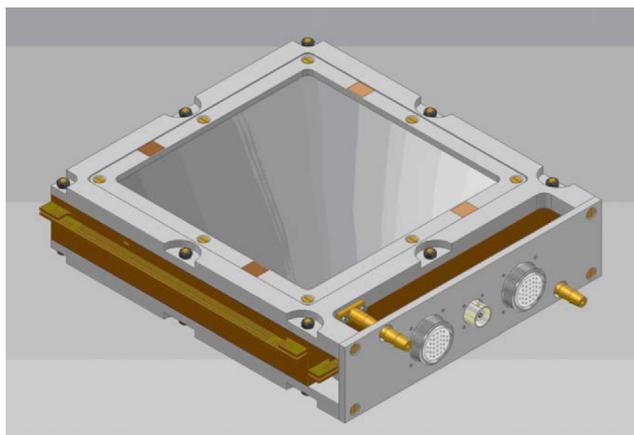
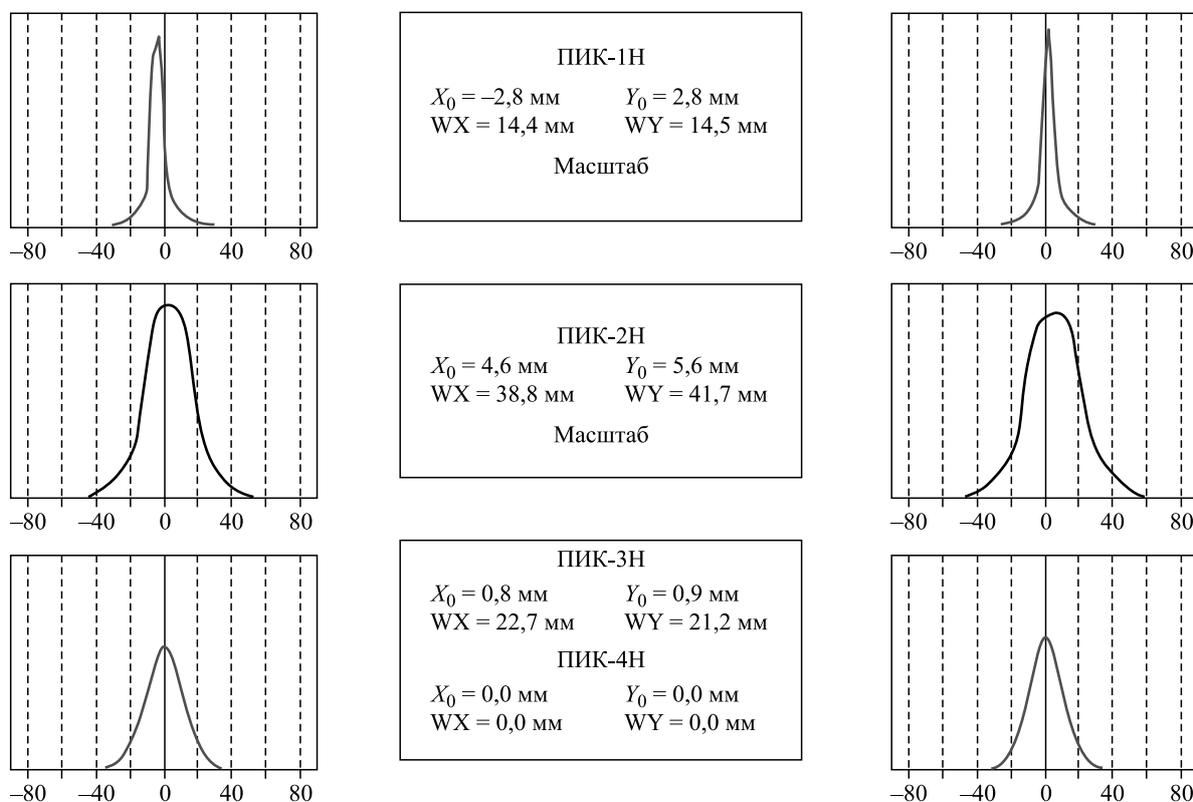


Рис. 4.1. Проволочная пропорциональная камера

ных пучков будут оснащены новой диагностической аппаратурой.

В 43-м сеансе было произведено первое включение новой подсистемы диагностики пучка МВ (рис. 4.3, 4.4). Подсистема предназначена для измерения пространственных характеристик выведенного пучка в 4 точках начальной части канала транспортировки с использованием проволочных пропорциональных камер и измерения интенсивности пучка с помощью ионизационной камеры. Предусмотрен удаленный просмотр данных.

Подсистема реализована на многофункциональном модуле сбора данных фирмы «National Instruments» NI USB-6259. Управление газовым усилением пропорциональных камер производится путем изменения высокого напряжения (источники высокого напряжения WENZEL N1130-4, модуль управления NI PCI-6703). Ток ионизационной камеры регистрируется субфемтоамперным усилителем DDPCA-300 (фирма «Femto»). Выходное напряжение усилителя преобразуется в частоту и измеряется счетчиком импульсов.



Интенсивность: 9,243E+009
 Время: 10:08:44
 Дата: 21/03/2011

Сумматор
 Суммарная: 0,000E+000
 Циклов: 0

Рис. 4.2. Профили пучка в начальной части канала транспортировки

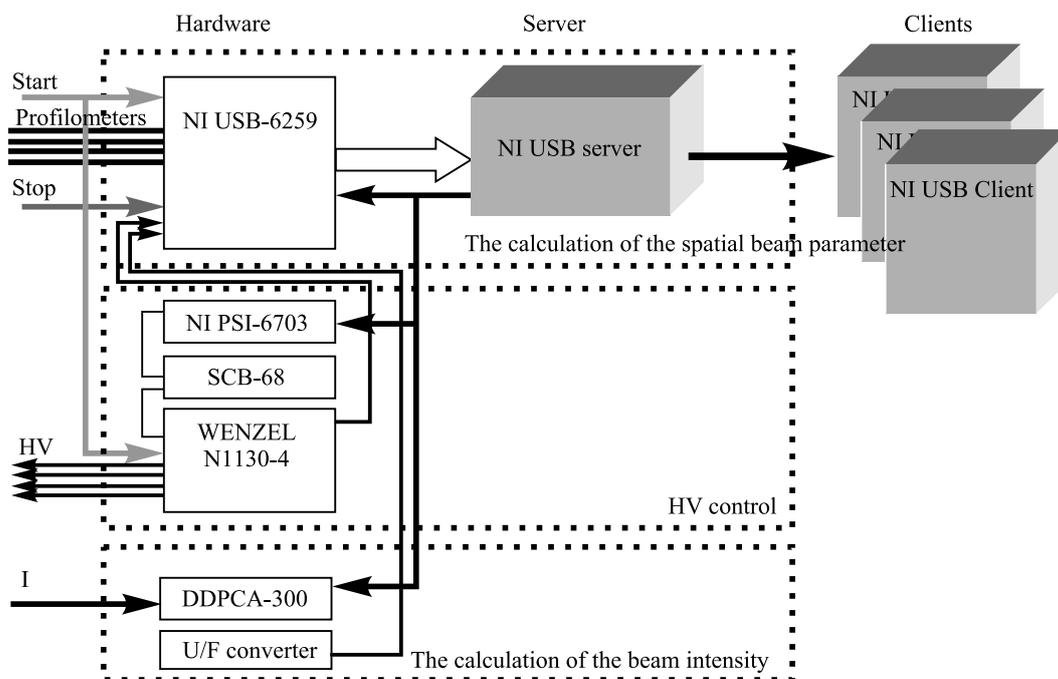


Рис. 4.3. Структурная схема новой подсистемы диагностики пучка MB

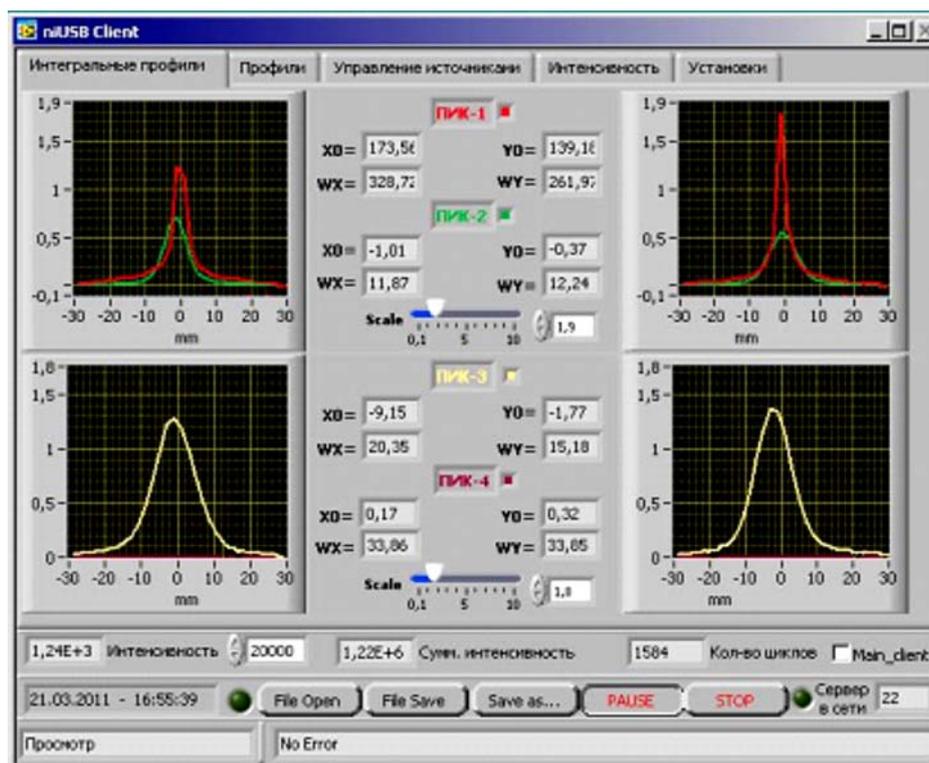


Рис. 4.4. Форма отображения информации о параметрах пучка

5. Перспективы развития комплекса

В данной статье приведены лишь некоторые основные результаты, полученные в ходе сеансов нуклотрона. При этом практически по всем системам, и при подготовке к сеансам, и в ходе их проведения, велись интенсивные работы, ориентиро-

ванные на повышение экономичности и надежности при увеличенной продолжительности сеансов.

В значительной степени это относится к системе криогенного обеспечения. Наиболее значимой демонстрацией успешности проведенной модернизации была надежная работа системы в ходе эксперимента по повышению поля в 42-м сеансе.

В промежутках между сеансами и в ходе сеансов проводилась оптимизация совместной работы и настройка винтовых компрессоров «Каскад-80/25» № 1 и 2, которые были введены в эксплуатацию в 41-м сеансе. Для дискретного регулирования производительности расхода сжатого гелия использовались поршневые компрессоры, один из которых (305НП-20/30 № 3) перед 43-м сеансом прошел капитальный ремонт. В этом сеансе он отработал 560 часов, замечаний по работе механической части не было. В ходе 43-го сеанса продолжались работы по совершенствованию технологии пополнения криогенной системы гелием из сосудов Дьюара. Жидкий гелий из сосудов Дьюара переливался непосредственно в сборники гелиевых установок (без промежуточной газификации), что уменьшает энергозатраты на закачку и ожижение гелия.

В 43-м сеансе на криогенном комплексе была введена в работу система диагностики установок КГУ-1600/4.5 № 1 и 2. Данная система позволяет

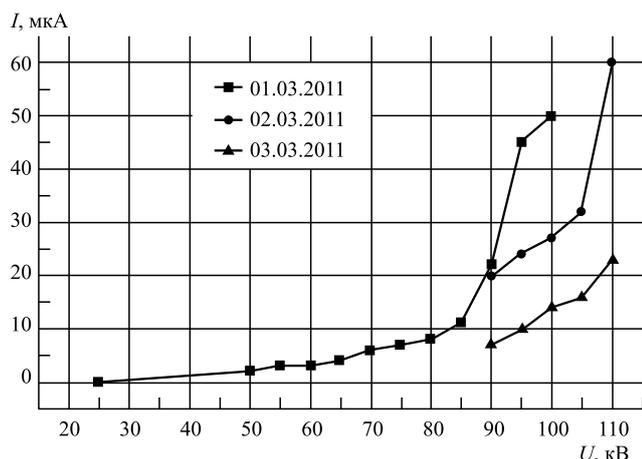


Рис. 5.1. Изменение тока утечки высоковольтного источника питания электростатического септума системы медленного вывода в процессе тренировки. 43-й сеанс

следить за изменением температур, уровней жидкого азота и жидкого гелия, числом оборотов турбодетандеров в реальном времени. Эти данные можно также выводить в графическом виде, что позволяет более оперативно вести технологические процессы охлаждения и криостатирования ускорителя. Эта система позволяет следить за процессами, происходящими на криогенном комплексе через интернет, что дает возможность ведущим технологам быть постоянно в курсе дел, а при необходимости и оперативно корректировать технологический процесс.

В ходе 43-го сеанса медленный вывод пучка был реализован при рекордной для нуклотрона энергии — 3,1 ГэВ/нукл. Дальнейшее поэтапное повышение энергии выведенного пучка, запланированное на ближайшие сеансы, напрямую связано с повышением напряжения на электростатическом септуме. В промежутках между сеансами новый источник высоковольтного питания был испытан на стенде до напряжения 200 кВ. В 43-м сеансе проводились работы по тренировке электростатического септума, напряжение на котором было доведено примерно до 120 кВ (рис. 5.1).

В 42-м, 43-м сеансах продолжалось постепенное улучшение вакуумных условий в пучковой камере нуклотрона, которое достигалось в основном за счет выявления и устранения источников натекания газа и оптимизации работы откачного оборудования. Средний вакуум на орбите оценивался по постоянной времени жизни пучка дейтронов, циркулирующего на поле инжекции, которая в 43-м сеансе достигла 35–40 с (рис. 5.2), что соответствует среднему статическому давлению примерно $(4-8) \cdot 10^{-10}$ Торр (азотный эквивалент при комнатной температуре).

В ноябре–декабре 2011 г. планируется провести еще один сеанс продолжительностью полтора-два

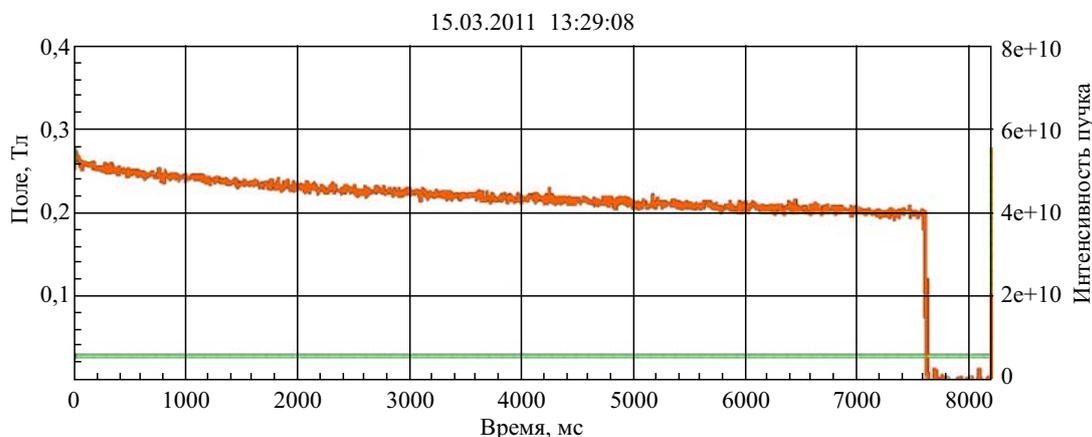


Рис. 5.2. Зависимость интенсивности пучка дейтронов от времени при циркуляции на столе инжекции. Полная шкала по горизонтальной оси соответствует 8 с. Начальная интенсивность примерно $3 \cdot 10^{10}$ ионов. 43-й сеанс работы нуклотрона

месяца и выйти на уровень 2000 часов работы в год. Основные задачи ускорительных смен, как этого сеанса, так и на ближайшую перспективу, — это подготовка к поэтапному повышению энергии и интенсивности ускоренного пучка, обеспечение требуемого качества медленного вывода во всем диапазоне энергий, вплоть до максимальной проектной.

Обсуждается возможность увеличения продолжительности работы в 2012 г. до 3000 часов, при предоставлении 60–70% времени для физических экспериментов. Основные проблемы, которые при этом необходимо решить, скорее кадровые, чем технические.

Список литературы

1. Коваленко А.Д. и др. Проект «Нуклотрон-М». Дубна: ОИЯИ, 2007.
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. Аверичев А.С., Агапов Н.Н., Алфеев А.В. и др. Итоги 39-го сеанса нуклотрона. Сообщение ОИЯИ Р9-2009-131. Дубна, 2009.
4. Аверичев А.С., Агапов Н.Н., Алфеев А.В. и др. Итоги 40-го и 41-го сеансов нуклотрона. Сообщение ОИЯИ Р9-2010-68. Дубна, 2010.
5. Agapov N., Alexandrov V., Brovko O. et al. Status of the Nuclotron. «Nuclotron-M» project // Proc. of IPAC-10, Kyoto, Japan. 2010. P. 684–686.
6. Agapov N., Alexandrov V., Brovko O. et al. Status of the Nuclotron // Proc. of RuPAC-2010, Protvino, Russia. 2010. P. 127–129.

Получено 14 июля 2011 г.

Редактор *Е. В. Калининкова*

Подписано в печать 16.09.2011.

Формат 60 × 84/8. Усл. печ. л. 2,09. Уч.-изд. л. 2,42. Тираж 360. Заказ № 57427.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6
E-mail: publish@jinr.ru
www.jinr.ru/publish/