

**РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
ПЕТЕРБУРГСКИЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ  
им. Б.П.КОНСТАНТИНОВА**

УДК 621.317.799:681.325

На правах рукописи

**Кравцов Пётр Андреевич**

**Контрольно-измерительные системы для установок  
газообеспечения в экспериментах STAR, PHENIX и  
поляризованной газовой мишени ANKE**

01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

**Гатчина-2002**

Работа выполнена в Отделении физики высоких энергий Петербургского института ядерной физики им. Б.П.Константинова РАН.

Научные руководители:

кандидат технических наук, с.н.с. Н.Н. Чернов,  
старший научный сотрудник А.А. Васильев.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор Краснов Л.В.,  
кандидат физико-математических наук, доцент Гребенщиков В.В.

Ведущая организация:

Институт теоретической и экспериментальной физики, Москва.

Защита состоится " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2002 г. в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д-002.115.01 в Петербургском институте ядерной физики им. Б.П.Константинова РАН по адресу:

188300, г. Гатчина Ленинградской обл., Орлова роща, ПИЯФ РАН

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ПИЯФ РАН.

Автореферат разослан " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2002 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

И.А. Митропольский

## **1. Общая характеристика работы.**

Работа посвящена созданию и применению контрольно-измерительных систем для установок газообеспечения крупных газовых детекторов в BNL<sup>1</sup>, США, и автоматизации измерений на источнике поляризованных атомов водорода (дейтерия) в FZJ<sup>2</sup>, Германия.

**Актуальность темы.** Современные экспериментальные установки в ядерной физике и физике высоких энергий представляют собой сложнейшие комплексы, состоящие из разнообразного оборудования. Как правило, по функциональным признакам они разделяются на подсистемы, такие, как системы охлаждения, газообеспечения, юстировки, высоковольтного питания, и другие. В этих условиях важной задачей является автоматическое управление каждой из таких “малых” физических установок и взаимодействие контрольно-измерительных систем между собой для обеспечения стабильной работы всего комплекса в целом.

При работе на ускорителях важнейшую роль играет высокая стоимость ускорительного времени. Она и определяет основное требование к контрольно-измерительным системам детекторов: они должны быть максимально надежны, чтобы свести к минимуму потери ускорительного времени из-за сбоев в работе детекторов. Большое количество ядерно-физических экспериментов проводится с использованием крупных газовых детекторов, параметры которых сильно зависят от свойств газовой смеси. В связи с этим надежное управление системами газообеспечения является актуальной задачей.

Наряду со сложными физическими комплексами не теряют своей актуальности небольшие экспериментальные установки. Характерной их особенностью в сравнении с подсистемами крупных детекторов является то, что, несмотря на кажущуюся простоту, управление ими осложнено разнородностью используемого оборудования. Это обусловлено отсутствием узкой специализации таких установок и широким кругом экспериментов, проводимых с их помощью. Часто задача автоматического управления такими системами совмещается с автоматизацией измерений и оптимизацией многочисленных параметров. Это накладывает дополнительные требования на надежность как программного, так и аппаратного обеспечения установки.

Контрольно-измерительные системы обоих типов установок должны работать в полностью автоматическом режиме без участия оператора, все измеряемые параметры должны сохраняться для последующего анализа наряду с историей событий, произошедших в системе. Кроме того, в малых

---

<sup>1</sup> Brookhaven National Laboratory, USA.

<sup>2</sup> Forschungszentrum Jülich, Germany.

физических установках первого типа важнейшие параметры должны пересылаться в центральную систему управления экспериментального комплекса и записываться вместе с общим потоком физических данных детектора.

Применение новейших технологий позволяет значительно снизить стоимость и сроки разработки и создания контрольно-измерительных систем. Появляется возможность создания универсальных программно-аппаратных комплексов, которые могут быть использованы для автоматизации управления обоими типами физических экспериментальных установок. Особенно важным является тесное взаимодействие с разработчиками самих объектов управления. Как правило, проектирование таких сложных систем происходит параллельно, при этом и физическая установка, и система управления постоянно модифицируются в соответствии с взаимными требованиями.

**Целью работы** является разработка и создание программно-аппаратного обеспечения для контрольно-измерительных систем установок газообеспечения в экспериментах STAR, PHENIX (алгоритмов и программ управления); автоматизация измерений на поляризованной газовой мишени ANKE; выработка практических приемов и способов построения надежных систем автоматического управления; создание универсальных приборов, применимых в различных экспериментах.

### **Научная новизна**

1. Разработаны основные алгоритмы и программные средства в виде комплекса программного обеспечения для автоматического многоуровневого управления системами газообеспечения.
2. Проведён анализ причин нестабильности работы и предложен метод построения контрольно-измерительных систем улучшенной надежности.
3. Разработан и создан ряд универсальных приборов, применимых как для решения задач автоматического управления, так и в качестве экспериментального оборудования.
4. Предложена и реализована структура построения распределенной многоуровневой контрольно-измерительной системы.
5. Проведен анализ экспериментальных данных, полученных с помощью разработанных измерительных систем.
6. Разработанный программный комплекс позволил провести ряд измерений на источнике поляризованных атомов водорода и оптимизацию его параметров, в результате чего достигнута наивысшая интенсивность для такого типа источников.

7. Прецизионные измерения магнитного поля постоянных шестиполосных магнитов с помощью системы автоматизации впервые экспериментально показали наличие высших гармоник в поле многополосного магнита, собранного из сегментов.

### **Практическая ценность и реализация результатов работы**

На базе проведенных исследований разработан универсальный программно-аппаратный комплекс автоматического управления системами газообеспечения следующих детекторов на ускорителе RHIC<sup>1</sup> в Брукхэвенской Национальной Лаборатории, США:

- Time Projection Chamber (TPC) в эксперименте STAR,
- Drift Chamber и Pad Chamber в эксперименте PHENIX,
- Time Expansion Chamber в эксперименте PHENIX,
- Muon Identification detector в эксперименте PHENIX.

Кроме того, аналогичная система управления применена для тестовых испытаний секторов детектора CSC<sup>2</sup> для эксперимента ATLAS в CERN.

Система управления показала себя надежной и удобной в эксплуатации. Разработанные алгоритмы и методы построения систем управления реализованы в виде универсальных программ и приборов, представляющих самостоятельный интерес, поскольку их применение не ограничивается газовыми системами.

В рамках данной работы созданы следующие приборы:

- Цифровой барометр. Прибор отображает на индикаторе и передает в ЭВМ текущее атмосферное давление в различных единицах измерения.
- Многоканальный термометр предназначен для измерения температуры в 16 точках с помощью платиновых термометров сопротивления Pt-100. В приборе реализована дополнительная возможность – четырехканальный коммутатор RS-232.
- Универсальная система автоматической блокировки “ALARM” предназначена как для автономной работы с программированием логики аварийных ситуаций с помощью ЭВМ, так и в качестве электроники для сбора данных и управления с помощью компьютера.
- Модуль КАМАК для управления микропроволочным монитором атомарного потока водорода для использования в составе системы управления поляризованного источника в эксперименте HERMES.

---

<sup>1</sup> Relativistic Heavy Ion Collider, BNL, USA.

<sup>2</sup> Cathode Strip Chamber

С помощью разработанной распределенной контрольно-измерительной системы выполнены оптимизационные исследования источника поляризованных атомов водорода в Исследовательском Центре Юлих, Германия. В частности, проведена оптимизация вакуумной системы для обеспечения максимальной скорости откачки в первой ступени источника. Ряд измерений с помощью системы автоматизации позволил значительно повысить интенсивность источника. В настоящее время источник продемонстрировал самую большую в мире интенсивность поляризованного водорода.

Прецизионные измерения магнитного поля постоянных секступольных магнитов, выполненные с помощью созданного программного комплекса, впервые экспериментально показали наличие гармоник высших порядков в формуле Хальбаха, описывающей поле секступоля, собранного из сегментов.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы докладывались на следующих конференциях:

- «Фундаментальные исследования в технических университетах», С-Петербург, 1998.
- International Workshop on “Polarized Sources and Targets” (PST99), Erlangen, Germany, 1999.
- International Workshop on “Polarized Sources and Targets” (PST01), Nashville, Indiana, USA, 2001.
- Accelerator and large experimental physics control systems (ICALPCS99), Trieste, Italy, 1999.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения и приложения; 13 таблиц, 68 рисунков и списка литературы. Общий объем диссертации 147 страниц.

### **Краткое содержание диссертации.**

**Введение** содержит формулировку основной цели работы и ее актуальность.

**Первая глава** содержит описание общих подходов при разработке контрольно-измерительных систем (КИС). Изложены основные требования, предъявляемые к КИС малых экспериментальных физических установок. Рассмотрены преимущества и недостатки многоуровневых систем управления. Проведен сравнительный анализ операционных систем.

В главе приведен краткий обзор систем реального времени, их классификация, обоснован выбор Windows NT в качестве базовой операционной системы для разработки КИС в рамках данной работы.

Рассмотрены современные объектно-ориентированные средства разработки программного обеспечения, языки программирования, а также основные методы разработки приборов и аппаратной части систем управления на базе однокристальных микроЭВМ семейства Intel 8051. Проведен краткий сравнительный анализ объектных языков программирования и обоснован выбор RAD<sup>1</sup>-системы Borland Delphi в качестве основного средства разработки при создании программ управления в рамках данной работы. Глава содержит также краткий обзор законов регулирования.

**Вторая глава** посвящена разработке и созданию систем управления для установок газообеспечения крупных газовых детекторов в экспериментах STAR и PHENIX на ускорителе RHIC в BNL (Brookhaven National Laboratory), США.

Газовая смесь в детекторах заряженных частиц должна постоянно обновляться, чтобы избежать расслоения смеси на составляющие и компенсировать утечки в результате диффузии и негерметичности детекторов. Продолжительная работа крупных газовых детекторов требует большого количества газа. Рециркуляция рабочей газовой смеси через детектор позволяет решить проблему обновления смеси и уменьшить расход дорогостоящих газов для создания свежей смеси.

В рециркуляционной системе газовая смесь циркулирует по специальному контуру, включающему в себя детектор, побудитель расхода (компрессор) и, возможно, блоки очистки газа. Давление до и после компрессора стабилизируется для поддержания постоянного избыточного давления внутри детектора. Часть смеси выбрасывается в вентиляцию или систему сбора и утилизации, соответствующее количество свежей смеси добавляется в циркулирующий поток для компенсации этого выброса и утечек детектора. Дополнительно в системе присутствует блок анализа смеси. Как правило, его проектируют таким образом, чтобы иметь возможность подключения к разным точкам системы для проверки состава смеси.

Подобные газовые системы были созданы для детекторов ALEPH TPC и для мюонных камер эксперимента L3. В данной главе рассматривается управление газовыми системами следующих детекторов:

- STAR TPC (Time Projection Chamber),
- PHENIX DC/PC (Drift Chamber / Pad Chamber),

---

<sup>1</sup> Rapid Application Development – система быстрой разработки приложений

- PHENIX TEC/TRD (Time Expansion Chamber / Transition Radiation Detector),
- PHENIX MuID (Muon Identification Detector),
- ATLAS CSC (Cathode Strip Chamber).

Глава содержит краткое описание каждой из газовых систем и особенностей управления ими. Для детектора ATLAS CSC рассматривается только газовая система для тестирования секторов детектора в BNL. Основные параметры газовых систем и приборы, разработанные для них, представлены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры газовых систем.

Детектор	STAR TPC	PHENIX			ATLAS CSC
		DC/PC	TEC/TRD	MuID	
Объем детектора, м <sup>3</sup>	50	6.6	11.8	50	1.1
Избыточное давление, мбар	2.00 ± 0.03	0.40 ± 0.01	0.40 ± 0.01	2.20 ± 0.03	0.01 ÷ 0.5
Поток рециркуляции, л/ч	36 000	6 000	6 000	1 800	60 ÷ 900
Поток свежей смеси, л/ч	90 ÷ 1980	60 ÷ 1200	60 ÷ 1200	60 ÷ 2100	3 ÷ 60
Состав смеси	Ar+10%CH <sub>4</sub> He+50%С <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	Ar+50%С <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	Ar+10%CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub> +9%iC <sub>4</sub> H <sub>10</sub> CO <sub>2</sub> +25%iC <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	60%Ar+ 30%CO <sub>2</sub> + 10%CF <sub>4</sub>
Электроника управления	Плата ввода-вывода	Keithley	Keithley	SCXI	ALARM
Приборы	Барометр, Термометр, ALARM	ALARM	ALARM	–	ALARM
Статус	Завершена в полном объеме	Работает без рециркуляции	Работает без рециркуляции	Завершена	Завершена

При разработке системы управления основное внимание уделялось защите дорогостоящего детектора от перепадов давления и поддержанию постоянного состава газовой смеси. С целью повышения надежности система управления была разделена на три независимых уровня:



- механический (жидкостные ограничители давления, управляющие датчики давления и т.д.), с временем реакции порядка 1 мс,
- электронный (блок автоматической блокировки “ALARM”, время реакции – 20 мс),
- компьютерный с временем реакции не более 1 минуты.

Для управления газовыми системами была разработана система автоматической блокировки “ALARM”. Прибор построен на однокристалльной микроЭВМ 8051 и имеет 32 аналоговых входа для чтения датчиков, 32 цифровых выхода для управления исполнительными устройствами, а также индикатор и клавиатуру. Основная задача прибора – обеспечить необходимый алгоритм обработки аварийных ситуаций независимо от управляющего компьютера. Кроме того, система автоматической блокировки может использоваться в качестве электроники управления и съема данных, как это сделано в газовой системе ATLAS CSC.

Программное обеспечение прибора написано на языке Avocet C51. Логика работы, в частности, алгоритмы реакции системы на аварийные ситуации, настраивается оператором с помощью компьютера, при этом не требуется каких-либо изменений во внутренней программе прибора. Гибкая настройка позволяет использовать систему автоматической блокировки не только для управления газовыми системами, но и в других экспериментальных установках. Значения аналоговых сигналов могут усредняться, что позволяет уменьшить влияние помех. Время реакции прибора без усреднения значений датчиков составляет 11 мс.

Кроме того, для измерения атмосферного давления был разработан цифровой барометр на базе микропроцессора Intel 8031. Давление измеряется с помощью датчика компании SenSym с диапазоном 0-780 мм рт. ст. и суммарной погрешностью 0.7 % от полной шкалы. Время измерения давления составляет 0.5 с, что позволяет уменьшить влияние помех. Калибровка прибора была произведена с помощью барометра-анероида М110. Прибор оснащен клавиатурой и индикатором и может использоваться как в составе системы управления, так и в качестве отдельного прибора.

Для измерения температуры в разных точках газовой системы был разработан многоканальный термометр, который имеет 16 каналов измерения температуры с помощью платиновых термометров сопротивления, подключаемых по четырехпроводной схеме. Точность измерения температуры составляет 0.1 К. Устройство оснащено коммутатором интерфейса RS-232 и обеспечивает подключение до трех приборов с этим интерфейсом к одному порту управляющего компьютера.

При разработке программного обеспечения для компьютерного уровня управления газовыми системами предъявлялись следующие требования:

- надежность и стабильность работы в отсутствие оператора,
- автоматическая обработка аварийных ситуаций,
- простота ручного управления газовой системой (дружественный интерфейс),
- отображение всех текущих параметров управляемой установки,
- накопление истории параметров с возможностью быстрого доступа и просмотра,
- обеспечение центральной управляющей системы детектора данными газовой системы,
- накопление истории событий, в частности, аварийных ситуаций,
- быстрая адаптация программного обеспечения ко всем газовым системам (универсальность программного комплекса),
- возможность тонкой настройки программного обеспечения в отсутствие разработчика,
- удаленный доступ к текущим параметрам установки и к состоянию исполнительных устройств,
- удаленный доступ к истории параметров с быстрым поиском и просмотром.

Такие требования хорошо удовлетворяются с помощью применения объектно-ориентированного программирования. Особенно удобно в таких случаях использовать крупноблочное компонентное программирование, что позволяет сделать программное обеспечение более универсальным и применять его в различных газовых системах с минимальными изменениями.

С целью повышения стабильности работы программы управления газовой системой целесообразно использовать многозадачную модель программирования, распараллелив задачу на отдельные независимо выполняющиеся процессы. В такой модели можно отделить наиболее ответственную часть задачи, а именно, съем информации с системы и управление, от потенциально сбойных операций, таких, как сохранение данных или просмотр истории. Кроме того, для хранения и визуализации больших объемов данных разумно применить технологии систем управления базами данных (СУБД), что значительно ускоряет поиск и выборку необходимых параметров системы и позволяет использовать стандартные программные средства для доступа к данным.

Программный комплекс для управления газовыми системами разрабатывался с использованием RAD-системы Delphi. В качестве рабочей операционной системы была выбрана ОС MS Windows 2000.

Программный комплекс для управления газовыми системами состоит из нескольких параллельно выполняющихся процессов. Все управление системами, как ручное, так и автоматическое, осуществляет процесс Gas System Control. Отдельный поток в этой программе опрашивает все датчики и контролирует состояние исполнительных устройств (DAQ thread), в то время как второй поток обеспечивает графический интерфейс с пользователем (GUI thread). Данные, полученные с датчиков, обрабатываются и передаются в другие процессы через разделяемую область памяти.

Отдельный процесс (Data Writer) получает текущие параметры системы и сохраняет их в базе данных. Выделение такой ненадежной и нестабильной во времени операции, как работа с базой данных, в отдельный процесс значительно повышает устойчивость всего программного комплекса в случае сбоев базы данных. Отдельный процесс посылает данные в центральную систему управления детектора, используя этот же системный сигнал о готовности данных. Это позволяет, во-первых, отделить потенциально сбойную операцию сетевого обмена от процесса управления и, во-вторых, легко изменять или добавлять связи с центральной управляющей системой без изменений в основной программе.

Быстрый поиск в базе данных и визуализацию информации осуществляет отдельная программа DB Viewer. Она также работает с использованием ядра базы данных MS Access для доступа к данным. Для дистанционного доступа к текущим параметрам газовой системы, а также к базе данных, используется специально разработанный WWW Server, который принимает запросы пользователя, переданные посредством любого WWW браузера, переводит их в запросы базы данных и передает полученные данные в виде файла или графика браузеру пользователя.

Программное обеспечение для управления газовыми системами разрабатывалось таким образом, чтобы минимизировать время, необходимое на адаптацию его к новой системе. Фактически описанные системы газообеспечения отличаются электроникой для сбора данных и управления, а также параметрами датчиков. Принципы управления, накопления и обработки данных одинаковы для всех перечисленных систем. Такое сходство, а также применение объектной модели позволили создать программный комплекс, ориентированный на абстрактную газовую систему и легко адаптируемый ко всем вышеперечисленным системам.

Гибкая конфигурация программы управления позволяет оператору легко добавлять обработку новых аварийных ситуаций по мере накопления опыта работы с системой, а также изменять уже существующие, без вмешательства разработчика. Кроме того, сходство конфигурации алармов в системе автоматической блокировки и в программном управляющем комплексе сильно упрощает работу оператора.

Практическое применение данного программного комплекса показало его высокую надежность, особенно в качестве управляющей подсистемы. Наиболее долгие сеансы работы производились в газовой системе детектора STAR TPC. За два года работы (максимальная продолжительность сеанса 6 месяцев) в программном обеспечении не было сбоев, влияющих на работу установки.

**Третья глава** посвящена созданию и применению контрольно-измерительной системы для источника поляризованных атомов водорода в Forschungszentrum Jülich, Германия.

Газовые поляризованные мишени представляют большой интерес для современной ядерной физики. Они применяются, в основном, на накопительных кольцах ускорителей, поскольку, в отличие от твердотельных поляризованных мишеней, не разрушают пучок. Несколько реакций с использованием газовой поляризованной мишени планируется исследовать с помощью спектрометра ANKE на накопительном кольце COSY-Jülich. С этой целью был разработан и построен источник поляризованных атомов водорода и дейтерия (ABS – Atomic Beam Source). Источник состоит из следующих основных частей:

- газовая система для подачи молекулярного водорода или дейтерия и диссоциатор для диссоциации молекул в нейтральные атомы;
- система формирования атомарной струи, включающая сопло, скиммер (геометрически похожий на сопло, направленное против пучка) и коллиматор на подвижных перегородках;
- две группы спин-сепарирующих постоянных магнитов;
- радиочастотные устройства сверхтонких переходов;
- открытая накопительная ячейка.

Источник поляризованных атомов разделен на четыре камеры, каждая из которых оснащена собственной системой откачки. Основная часть атомарной струи, вылетающей из сопла, рассеивается на скиммере и откачивается в первой ступени. Вторая ступень расположена между скиммером и коллиматором. Третья и четвертая ступени содержат по одной группе магнитов и одному блоку сверхтонких переходов.

Система управления ABS функционально разделена на две части: система “медленного” контроля установки и пакет программ для проведения измерений. Первая из них обеспечивает функционирование источника, управление отдельными его элементами, такими, как высокочастотный генератор для диссоциатора, насосы вакуумной системы, автоматические устройства водяного охлаждения и т.д. Вторая часть предназначена для автоматизации измерений параметров источника.

Система “медленного” контроля ABS построена на индустриальной автоматике фирмы Siemens семейства SIMATIC S7 и представляет собой распределенную систему управления с одним центральным компьютером. Для связи с измерительными программами и управления источником в ходе эксперимента на накопительном кольце был разработан специальный протокол обмена данными. Он основан на протоколе XDR<sup>1</sup> и обеспечивает передачу данных через интернет с помощью UDP<sup>2</sup>-пакетов.

Для автоматизации измерений на ABS была разработана специальная программа, выполняющаяся на отдельном компьютере. При разработке использовалась схема построения программного обеспечения, аналогичная контрольно-измерительным системам установок газообеспечения. Каждое измерение заключается в сканировании одного из параметров источника, в течение которого для каждой точки сканирования программа ожидает стабилизации температуры сопла, после чего считывает все необходимые параметры и записывает их в файл данных. Различные измерения могут объединяться в последовательности, которые обрабатываются автоматически без участия оператора. Программное обеспечение для измерений обеспечивает подключение дополнительных приборов с различными интерфейсами без изменений в системе управления источником.

С помощью рассмотренного программного обеспечения был проведен ряд измерений на источнике. В частности, была оптимизирована система откачки первой ступени, что чрезвычайно важно для работы установки, поскольку при низкой скорости откачки взаимодействие атомарного пучка с остаточным газом разрушает направленный поток атомов и, в конечном итоге, приводит к уменьшению плотности внутренней мишени накопительного кольца. Исследования вакуумной системы позволили более чем вдвое понизить давление в первой камере установки за счет установки в сборку из четырех турбонасосов и двух мембранных насосов дополнительного малого турбонасоса.

Для измерений с помощью проволочного монитора атомарного потока на источнике была разработана специальная плата управления, которая была интегрирована в программное обеспечение для автоматизации измерений. Кроме того, для использования монитора в составе атомарного источника в DESY, Гамбург, был разработан модуль КАМАК на базе процессора Atmel 89S8252, обеспечивающий управление монитором и измерение профиля атомарного пучка.

В связи с применением постоянных секступольных магнитов для фокусировки атомарного пучка возникла необходимость измерения

---

<sup>1</sup> eXternal Data Representation, RFC 1014 and RFC 1832 (1995).

<sup>2</sup> User Datagram Protocol RFC 768 (1980).

магнитного поля внутри этих магнитов. Такие измерения были проведены с помощью контрольно-измерительной системы ABS.

Шесть постоянных секступольных магнитов, состоящих из 24 сегментов каждый, с полем на поверхности материала около 1.6 Т, были произведены фирмой Vakuumschmelze Hanau. При производстве магнитов использованы три различных материала, различающиеся по намагниченности и коэрцитивной силе. Применение материалов нового поколения на основе ниодима, железа и бора позволило значительно увеличить величину магнитного поля в полюсах, по сравнению с существующими магнитами на базе самария и кобальта.

Цилиндрический 2N-полюсный магнит, собранный из M сегментов, был подробно описан Хальбахом (Halbach):

$$B_r(r, j) = J_0 \cdot \sum_{n=0}^{\infty} H_n \cdot \left( \frac{r}{r_1} \right)^{n-1} \cos(nj),$$

$$B_t(r, j) = J_0 \cdot \sum_{n=0}^{\infty} H_n \cdot \left( \frac{r}{r_1} \right)^{n-1} \sin(nj).$$

Для магнитов, собранных из постоянно намагниченных сегментов, формула Хальбаха позволяет сделать следующие выводы:

- амплитуда поля секступольного (N=3) магнита из 24 сегментов превышает амплитуду поля магнита из 12 сегментов на 15.5% для одинаковых материалов и размеров;
- отклонение от идеального секступоля (высшие мультипольные компоненты в формуле Хальбаха) проявляется только на незначительных расстояниях от поверхности магнита, поскольку показатель степени радиальной зависимости высших мультипольных компонентов ( $\nu > 0$ ) становится для M=24 очень большим (26 уже для первого компонента  $\nu = 1$ ). Высшие мультипольные компоненты для  $\nu = 1$  и  $\nu = 2$  соответствуют азимутальным зависимостям 54-полюсного и 102-полюсного магнитов.

Постоянный магнит характеризуется намагниченностью J и зависящей от температуры коэрцитивностью  $H_{cJ}$ . Суперпозиция полей различных сегментов магнита ведет к демагнетизации, которая является ограничивающим фактором для увеличения амплитуды поля в полюсах. Моделирование магнитного поля в программе MAFIA позволило выделить наиболее критические участки магнита с наибольшей демагнетизацией.

Кроме того, для всех шести магнитов была рассчитана ожидаемая амплитуда магнитного поля на полюсах  $B_0$  как с использованием формулы Хальбаха ( $B_0^{HAL}$ ), так и моделированием в программе MAFIA<sup>1</sup> ( $B_0^{MAF}$ ). При этом в ряде Хальбаха использовался только «чистый» секступольный член ( $n = 0$ ). Результаты расчетов вместе с характерными размерами магнитов приведены в таблице 2. Амплитуды поля указаны в Теслах, все размеры – в миллиметрах.  $B_0$  и  $B_0^*$  – амплитуды поля, полученные из радиальных и азимутальных зависимостей соответственно;  $\Delta r$  – сдвиг магнитной оси относительно геометрической оси магнита.

Таблица 2. Линейные размеры и амплитуды поля в магнитах

Магнит	l	r <sub>1</sub>	r <sub>2</sub>	$B_0^{HAL}$	$B_0^{MAF}$	$B_0$	$B_0^*$	$\Delta r$
1	40	5/7*	20	1.672	1.633	1.654	1.630	0.129
2	65	8/11*	32	1.680	1.641	1.684	1.689	0.043
3	70	14	47	1.674	1.642	1.625	1.628	0.111
4	38	15	47	1.650	1.564	1.565	1.583	0.040
5	55	15	47	1.650	1.605	1.621	1.607	0.017
6	55	15	47	1.650	1.605	1.621	1.611	0.176

\* магнит с коническим отверстием, первое значение соответствует радиусу входного отверстия, второе – выходного.

Значения амплитуды поля, полученные расчетом по формуле Хальбаха, систематически превышают значения, полученные моделированием в программе MAFIA, особенно для короткого магнита № 4. Это можно объяснить тем, что формализм Хальбаха двумерен, т.е. предполагает бесконечно длинный магнит, в то время как MAFIA моделирует трехмерные поля и, таким образом, учитывает конечную длину магнита.

Разница в амплитудах поля, полученных из радиальных и азимутальных зависимостей, объясняется тем, что экстраполяция радиальной

<sup>1</sup> CST GmbH, Buedinger Str. 2a, D-64289 Darmstadt, Germany.

зависимости не учитывает влияние высших гармоник в формуле Хальбаха вблизи поверхности магнита, которые снижают амплитуду поля. Азимутальные зависимости измерялись на малом расстоянии от поверхности, и, следовательно, учитывают влияние высших гармоник.

Для исследования магнитного поля внутри секступольных магнитов для каждого из них были проведены измерения вдоль радиуса магнита, параллельно оси магнита на максимальном радиусе, а также получены азимутальные зависимости поля на разных радиусах на входной, выходной и средней плоскостях магнита. Использование датчика Холла малых размеров (200x100 мкм с толщиной 15 мкм) позволило измерять поля близко к поверхности магнита, где градиент поля велик.

В результате измерений и анализа полученных данных впервые удалось экспериментально подтвердить наличие высших гармоник в формуле Хальбаха. Кроме того, было исследовано влияние конечных размеров датчика Холла и его сдвига на измеряемую величину поля.

**Заключение** содержит основные результаты проделанной работы.

## **Основные результаты**

1. Разработаны принципы организации и предложена объектная многозадачная структура универсальной контрольно-измерительной системы для установок газообеспечения ряда детекторов в экспериментах STAR, PHENIX, а также для тестирования детектора ATLAS CSC. Создан программный комплекс для управления газовыми системами.
2. Исследованы системы управления газовыми системами других детекторов. Разработана и реализована на практике методика автоматической обработки аварийных ситуаций с возможностью изменения алгоритма обработки оператором.
3. Разработан и создан ряд универсальных приборов, применимых как для решения задач автоматического управления, так и в качестве экспериментального оборудования.
4. Проведён анализ экспериментальных данных, полученных с помощью разработанных измерительных систем. На основании этого внесены необходимые изменения в газовые системы и улучшены их параметры.
5. Предложена и реализована структура построения распределенной многоуровневой системы автоматизации измерений для источника поляризованных атомов водорода. Разработан программный комплекс для управления и измерений на источнике.



6. Проведён ряд измерений на источнике поляризованных атомов водорода и оптимизация его параметров, в результате чего достигнута наивысшая интенсивность для такого типа источников.
7. Впервые экспериментально исследовано влияние высших гармоник на амплитуду магнитного поля постоянных шестиполусных магнитов, собранных из сегментов.
8. Аналитически исследовано влияние конечных размеров датчика Холла и его сдвига на измеряемую этим датчиком величину поля.

**По теме диссертации опубликованы следующие работы:**

1. С. Козлов, Л. Коченда, П. Кравцов, “Цифровой барометр для установок «медленного» контроля”, ПТЭ № 3, 2000, с. 166-167.
2. L.Kotchenda, P.Kravtsov, V.Trofimov. “Universal Microprocessor interlock system,” Instruments and Experimental Techniques **43**, № 4 (2000), pp. 504-505.
3. L.Kotchenda, M.Strikhanov, R. Wells, H.Wieman, P.Kravtsov, S.Kozlov, V.Trofimov, A. Markov, “STAR TPC Gas System,” preprint PNPI-2219, Gatchina, 1998, 22p.
4. L.Kotchenda, P.Kravtsov, V.Trofimov. “Alarm/Interlock of Gas Systems for PHENIX Experiment,” Preprint PNPI-2374, Gatchina, 2000, 13p.
5. J. Lin, ..., P.Kravtsov et al. (By STAR Collaboration), “Hardware Controls for the STAR Experiment at RHIC.” IEEE Trans.Nucl.Sci. **47**, 2000, pp. 210-213.
6. A.Vassiliev, V.Nelyubin, V.Koptev, P.Kravtsov B.Lorentz, H.J.Marik, M.Mikirtychiants, M.Nekipelov, F.Rathmann, H.Paetz gen. Schieck, H.Seyfarth, E.Steffens, “24 Segment High Field Permanent Sextupole Magnets,” Rev. Sci. Instrum., **71**, No.9, September 2000, pp. 3331-3341.
7. V. Koptev, A. Kovalev, P. Kravtsov, F. Rathmann, H. Seyfarth, A. Vassiliev, “Optimization of the Vacuum System of the Atomic Beam Source,” preprint PNPI-2266, Gatchina, 1998, 17p.
8. P.Kravtsov, R.Baldauf, H.Kleines, M.Mikirtychiants, M.Nekipelov, F.Rathmann, J.Sarkadi, H.Seyfarth, A.Vassiliev, K.Zwoll, “The Slow Control System for the ANKE ABS,” Proc. Int. Workshop on Polarized Sources and Targets (PST99), Erlangen, 1999, pp. 474-477.
9. A.Vassiliev, V.Koptev, A.Kovalev, P.Kravtsov, M.Mikirtychiants, M.Nekipelov, F.Rathmann, H.Seyfarth, “Investigation of the Atomic Hydrogen Beam with a Two-dimensional Multiwire Monitor,” Proc. Int. Workshop on Polarized Sources and Targets (PST99), Erlangen, 1999, pp. 200-203.