

М-16

**МАКОВЕЕВ**  
Владимир Кузьмич

**РАЗРАБОТКА, ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ  
КОМПЛЕКСА ОБОРУДОВАНИЯ  
ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ ДАТЧИКОВ МАГНИТНОГО ПОЛЯ  
В РАДИАЦИОННЫХ УСЛОВИЯХ  
ДЛЯ МОНИТОРИНГА МАГНИТНОГО ПОЛЯ  
НА УСКОРИТЕЛЯХ**

Специальность: 01.04.20 — физика пучков заряженных частиц  
и ускорительная техника

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

345с

Работа выполнена в Лаборатории физики частиц Объединённого института ядерных исследований.

Научные руководители:

кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник Лачинов Владимир Михайлович  
кандидат физико –  
математических наук, Иванов Игорь Николаевич  
старший научный сотрудник

Официальные оппоненты:

доктор технических наук,  
старший научный сотрудник Тютюнников Сергей Иванович

кандидат физико –  
математических наук, доцент Гаркуша Олег Владимирович

Ведущая организация: Государственный научный центр  
Российской Федерации Институт физики высоких энергий  
(г.Протвино).

Защита диссертации состоится “ ” 2002 г.  
в часов на заседании диссертационного совета в  
Лаборатории физики частиц Объединённого института ядерных  
исследований, г.Дубна Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЛФЧ ОИЯИ.

Автореферат разослан “ ” 2002 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета  Кривохижин  
Василий Геннадьевич

## Общая характеристика работы

### Актуальность темы

В различных областях современной науки и техники, экологии и здоровья человека существует целый ряд задач, когда необходимо измерять магнитные поля в условиях экстремальных воздействий окружающей среды, например, высокие уровни радиации. Примерами такого рода задач являются:

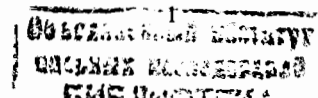
- физические эксперименты на современных ускорителях и детекторах частиц, типа LHC, CMS (ЦЕРН), на экспериментальных установках, например, ИРЕН (ЛНФ), КОМБАС (ЛЯР), на ядерных реакторах, например, ИБР-2 (ЛЯР);
- безопасное обслуживание систем захоронения радиоактивных отходов;
- безопасная эксплуатация медицинских ускорителей и радиотомографов;
- бесконтактные системы измерения электрического тока и защиты электросетей и оборудования на атомных электростанциях;
- контрольно-измерительные и управляющие системы космических аппаратов.

Например, основным параметром любого детектора частиц является высокое разрешение по импульсу частицы (например, для CMS – 5 % при энергии  $E = 1$  ТэВ), точность расчета которого определяется точностью измерения радиуса траектории пролета частицы и точностью измерения магнитного поля соленоида в точках на этой траектории. Современный уровень развития координатных детекторов позволяет измерять координату частицы с высокой точностью (лучше 100 мкм или  $3 \times 10^{-5}$  % при радиусе траектории пролета частицы - 3 м). В то же время точность измерения магнитного поля в радиационных условиях эксперимента в сильной степени ограничена радиационной стойкостью датчиков магнитного поля и находится на уровне ~ 1%.

Компьютерное моделирование магнитных полей позволило с некоторым приближением связать значение магнитного поля в рабочей области и вне ее. Использование данных компьютерного моделирования, результатов магнитных измерений вне радиационного поля и данных по измерению токов в магнитах позволило существенно поднять точность восстановления значения магнитного поля на траектории пролета частицы, т.е. в рабочем объеме, до ~ 0.1 %. Надо подчеркнуть, что подобные косвенные измерения магнитного поля имеют указанную точность только в стационарном режиме, когда не учитываются, во-первых, наличие большого количества оборудования непосредственно в рабочей области магнитного поля, во-вторых, «старение» материалов, из которого изготовлен сам магнит, поддерживающих конструкций, оборудования, электроники и т.д. в результате радиационной нагрузки.

Исходя из этого очень серьезные требования предъявляются к материалам конструкции как самого магнита, так и всего оборудования внутри магнита. Так для LHC необходимая долговременная стабильность параметров всего оборудования должна обеспечиваться в течении 10 лет работы ускорителя. Данные требования всегда являются компромиссом между необходимой точностью проведения эксперимента и технологическими возможностями конструкции. Достичь абсолютной "прозрачности" оборудования для магнитного поля практически невозможно, что приводит к искажению его распределения, особенно в условиях больших градиентов магнитного поля. С увеличением радиационной нагрузки эти искажения карты магнитного поля только усиливаются.

В этих условиях провести коррекцию магнитного поля возможно с помощью мониторинга магнитного поля в реальных условиях работы установки. Но при этом не



только вся конструкция подвергается интенсивному облучению, в результате чего происходит ее «старение», но и вся измерительная электроника, включая датчики магнитного поля.

Решение задач мониторинга магнитного поля в радиационных условиях в конечном счете определяется радиационной стойкостью датчиков магнитного поля.

Таким образом, исследование радиационной стойкости датчиков магнитного поля является важной научной задачей и имеет большой практический интерес для мониторинга магнитного поля в различных физических установках в условиях высоких радиационных потоков.

В этом свете данная работа является актуальной на сегодняшний день.

### Цель и задачи диссертационной работы

Целью данной работы являлось разработка, изготовление и применение комплекса оборудования для испытания датчиков магнитного поля в радиационных условиях для мониторинга магнитного поля на ускорителях.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие основные задачи:

- Выработать методику проведения всего комплекса работ по изучению радиационной стойкости датчиков магнитного поля.
- Создать соответствующую экспериментальную базу на основе магнитокалибровочных стендов ЛФЧ для измерения характеристик датчиков магнитного поля до и после облучения.
- Разработать и изготовить необходимую измерительную аппаратуру для исследования характеристик образцов датчиков магнитного поля до и после облучения.
- Разработать необходимую технологию облучения образцов в различных условиях эксперимента; оборудовать облучательные стенды необходимыми приспособлениями для загрузки в активную зону на строго определенное время, которое определяло уровень дозы облучения, и выгрузки образцов из активной зоны, обеспечив их безопасное хранение как на месте проведения облучения, так и при измерениях на магнитокалибровочных стендах.
- Исследовать радиационную стойкость различных типов датчиков магнитного поля. В тех случаях, когда это возможно, провести их модернизацию с целью улучшения их радиационной стойкости. Отобрать наиболее радиационностойкие датчики магнитного поля.
- Разработать и испытать прототип магнитометрической аппаратуры на основе создаваемых радиационностойких датчиков магнитного поля в условиях реального эксперимента на ускорителе.

### Научная новизна работы

В диссертационной работе приведены новые результаты по радиационной стойкости различных датчиков магнитного поля; первые результаты эксперимента по мониторингу магнитного поля в радиационных полях на ускорителе У-400М (ЛЯР, ОИЯИ).

1. На основе разработанной в ОИЯИ технологии облучения образцов получены первые результаты по исследованию:

a) характеристик микродатчиков Холла, изготовленных по оригинальной технологии в Государственном Университете «Львовская Политехника» (ГУ «ЛП» г. Львов, Украина) из дискретных микрокристаллов на основе традиционных полупроводниковых материалов типа III-V до и после облучения быстрыми нейтронами со средней энергией  $\langle E_n \rangle = 1.3$  МэВ и с флюенсом от  $10^{14}$  до  $10^{20}$  н/м<sup>2</sup> (на стендах ОИЯИ);

b) характеристик Полевых датчиков магнитного поля, изготовленных на основе современной полупроводниковой интегральной технологии «кремний на изоляторе» в Институте Проблем Технологии Микроэлектроники и Особо Чистых Материалов Российской Академии Наук (ИПТМ РАН, г. Черноголовка, Россия) до и после облучения быстрыми нейтронами с энергией от 0.1 до 25 МэВ и с флюенсом от  $10^{16}$  до  $10^{18}$  н/м<sup>2</sup> (на стендах ОИЯИ);

c) радиационной стойкости высокостабильных Вертикальных датчиков магнитного поля, созданных по технологии биполярных интегральных схем в Швейцарском Федеральном Институте Технологии (ШФИТ, г.Лозанна, Швейцария) при облучении быстрыми нейтронами со средней энергией  $\langle E_n \rangle = 1.3$  МэВ и с флюенсом от  $10^{17}$  до  $10^{19}$  н/м<sup>2</sup> (на стендах ОИЯИ и ШФИТ).

2. Проведены эксперименты и впервые получены результаты по мониторингу магнитного поля в различных реальных радиационных полях на ускорителе У-400М (ОИЯИ) в течении одного сеанса длительностью 104 часа, где флюенс гамма-излучения был в диапазоне  $10^7 \div 10^9$  г/м<sup>2</sup> и флюенс нейтронов –  $10^{13} \div 10^{16}$  н/м<sup>2</sup>, при энергии  $E = 0 \div 10$  МэВ. При этом, суммарная относительная точность мониторинга магнитного поля при этих максимально достигнутых дозах облучения ДХ в процессе эксперимента составила:

- a) для промышленного ДХ (ПХЭ605, г. С-Петербург, а/о «Магнетон») – 0.17%,
- b) для отобранных радиационностойких ДХ (ГУ «ЛП», г. Львов) – 0.07 %.

3. В результате эволюции технологии изготовления ДХ на основе проведенных исследований было впервые достигнуто значительное улучшение радиационной стойкости ДХ. Если в начале исследований изменение чувствительности ДХ при облучении быстрыми нейтронами с флюенсом  $F \sim 10^{18}$  н/м<sup>2</sup> было на уровне единиц процентов, то в результате наших исследований этот параметр уменьшился на порядок и составил не более 0.2 % при облучении быстрыми нейтронами с флюенсом  $F = 1.4 \times 10^{18}$  н/м<sup>2</sup>.

### Практическая значимость работы

1. Создан комплекс оборудования в ЛФЧ ОИЯИ с целью использования его как для исследования радиационной стойкости датчиков магнитного поля, так и для калибровки вновь создаваемой магнитометрической аппаратуры в магнитных полях до 5 Тл, состоящий из измерительной аппаратуры, калибровочных и облучательных стендов, механизмов перемещения датчиков магнитного поля на стендах:

- Измерительная аппаратура обеспечивала относительную точность измерений магнитного поля холловским магнитометром, изготовленным в ЛФЧ, на уровне 0.02 % и абсолютную точность измерений (0.001 % от  $B_{обр}$ ) прецизионным ЯМР - магнитометром РТ 2025 производства фирмы METROLAB.

- На магнитокалибровочных стендах ЛФЧ обеспечивалась высокая относительная точность (~ 0.01 %), а для сверхпроводящего стенда и абсолютная точность (~ 0.01 %), многократного повторения условий эксперимента на «теплом» и «холодном» магнитокалибровочных стендах в полях до 5 Тл при исследовании радиационной стойкости датчиков магнитного поля.

- Специальное  $3^x$  – координатное приводное устройство обеспечивало перемещение и фиксацию испытуемых образцов ДХ в рабочем зазоре магнита с точностью  $\sim 0.1$  мм.
  - Разработаны и внедрены экспериментальные методы облучения образцов датчиков магнитного поля на реакторе ИБР-2 (ЛНФ, ОИЯИ), где была отработана необходимая технология облучения образцов и созданы соответствующие экспериментальные условия на реакторе для проведения радиационных исследований образцов датчиков магнитного поля.
2. Созданы микроминиатюрные радиационнстойкие датчики магнитного поля в рамках совместной работы ОИЯИ с ГУ "ЛП" (г. Львов, Украина) по проектам Украинского Научно-Технического Центра (УНТЦ) № 320 и Международного Научно-Технического Центра (МНТЦ, ОИЯИ, г. Дубна, Россия) № 639. При этом было исследовано более 400 образцов датчиков магнитного поля и были сформулированы рекомендации по совершенствованию технологии изготовления радиационнстойких датчиков магнитного поля. На базе разработанных нами радиационнстойких микродатчиков магнитного поля в ГУ «ЛП» совместно с инженерами из Канады и Японии изготовлена и испытана магнитометрическая аппаратура для измерения магнитного поля в радиационных условиях на ускорителях. На создаваемом ускорителе ИРЕН в ОИЯИ планируется проводить мониторинг магнитного поля в радиационных условиях с помощью разработанных нами радиационно-стойких микродатчиков магнитного поля.
  3. Проведены первые измерения радиационной стойкости высокостабильных Вертикальных датчиков магнитного поля изготовленных в ШФИТ (г. Лозанна, Швейцария) в рамках проекта МНТЦ (ОИЯИ, г. Дубна, Россия) № 639.
  4. Проведены первые исследования радиационной стойкости Полевых датчиков магнитного поля, изготовленных на основе современной полупроводниковой интегральной технологии «кремний на изоляторе» в ИПТМ РАН (г. Черноголовка, Россия) в рамках проекта МНТЦ (ОИЯИ, г. Дубна, Россия) № 639.
  5. Впервые предложен и реализован метод по проведению первых долговременных испытаний магнитометрической аппаратуры для мониторинга магнитного поля в реальных радиационных условиях проведения эксперимента на ускорителе У-400М (ЛЯР, ОИЯИ) в течении одного сеанса длительностью 104 часа. Для этой цели разработан и изготовлен прототип магнитометрической аппаратуры на базе радиационнстойких микродатчиков Холла.

#### Автор защищает:

- Комплекс оборудования для исследования радиационной стойкости датчиков магнитного поля, состоящий из измерительной аппаратуры, калибровочных и облучательных стендов, прецизионных механизмов перемещения датчиков магнитного поля на стендах.
- Результаты исследований радиационной стойкости микродатчиков Холла на базе традиционных полупроводниковых материалов III–V, изготовленных в ГУ «ЛП» (г.Львов, Украина), при облучении быстрыми нейтронами со средней энергией  $\langle E_n \rangle = 1.3$  МэВ и с флюенсом от  $10^{14}$  до  $10^{20}$  н/м<sup>2</sup> (на стендах ОИЯИ).
- Результаты исследований радиационной стойкости Полевых датчиков Холла, изготовленных на основе современной полупроводниковой интегральной технологии «кремний на изоляторе» в ИПТМ РАН (г. Черноголовка, Россия), при облучении быстрыми нейтронами с энергией от 0.1 до 25 МэВ и с флюенсом от  $10^{16}$  до  $10^{18}$  н/м<sup>2</sup> (на стендах ОИЯИ).

- Результаты исследований радиационной стойкости Вертикальных датчиков Холла, изготовленных по технологии биполярных интегральных схем в ШФИТ (г. Лозанна, Швейцария) при облучении быстрыми нейтронами со средней энергией  $\langle E_n \rangle = 1.3$  МэВ и с флюенсом от  $10^{17}$  до  $10^{19}$  н/м<sup>2</sup> (на стендах ОИЯИ и ШФИТ).
- Результаты исследований радиационной стойкости промышленных датчиков Холла типа ПХЭ605 (г. С-Петербург, а/о «Магнетон») для флюенса нейтронов  $F = 1.16 \times 10^{16}$  н/м<sup>2</sup> с энергией  $E = 0 \div 10$  МэВ (на стендах ОИЯИ).
- Впервые предложенные и реализованные экспериментальные методы по исследованию:
  - a) характеристик датчиков магнитного поля на магнитокалибровочных стендах ЛФЧ до и после облучения быстрыми нейтронами со средней энергией  $\langle E \rangle = 1.35$  МэВ при различных значениях флюенсов от  $10^{17}$  до  $10^{20}$  н/м<sup>2</sup> на реакторе ИБР-2 ОИЯИ.
  - b) радиационной стойкости датчиков Холла в реальных условиях эксперимента в течении одного сеанса длительностью 104 часа на ускорителе У-400М (ЛЯР, ОИЯИ) при флюенсе гамма-излучения в диапазоне  $10^7 \div 10^9$  г/м<sup>2</sup> и флюенсе нейтронов –  $10^{13} \div 10^{16}$  н/м<sup>2</sup>, при энергии  $E = 0 \div 10$  МэВ.

#### Апробация работы

Основные результаты, приведенные в диссертации, докладывались и обсуждались на следующих конференциях и совещаниях:

1. "The 9<sup>th</sup> International Magnet Measurement Workshop (IMMW-9)", CEA, Saclay, France, June, 1995.
2. "The 2<sup>nd</sup> International Conference VITT-97", Minsk, September, 1997.
3. 1997 IEEE "The 15<sup>th</sup> International Magnet Technology Conference (MT-15)", Peking, October, 1997.
4. "The EUROSENSOR-12 Conference", Southampton, England, September, 1998.
5. "The 11<sup>th</sup> International Magnet Measurement Workshop (IMMW-11)", BNL, Upton, NY, USA, September, 1999.
6. 1999 IEEE "The 16<sup>th</sup> International Magnet Technology Conference (MT-16)", NMFLL, Tallahassee, Florida, USA, September, 1999.
7. The Conference «Radiation Hardness of Electronic Systems», Lytkarino, Moscow Region, Russia, June, 1999.
8. The 7<sup>th</sup> European Particle Accelerator Conference (EPAC-2000), Vienna, Austria, June, 2000.
9. 2001 IEEE "The 17<sup>th</sup> International Magnet Technology Conference (MT-17)", CERN, Geneva, Switzerland, September, 2001.
10. Рабочие совещания:
  - a) по смежным проектам УНТЦ № 320 и МНТЦ № 0639. ГУ «ЛП», г.Львов, Украина, 10 ноября 1998г;
  - b) по итогам работ по проекту МНТЦ № 639. ОИЯИ, Дубна, Россия, 24 ноября 1999 г.

## Публикации

По материалам диссертации опубликовано 12 научных работ.

## Содержание диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, семи глав, заключения и библиографии. Диссертация содержит 27 рисунков, 1 таблицу, библиографию из 72 наименований и имеет общий объем 76 страниц.

**Во введении** излагается общий подход к проблеме мониторинга магнитного поля в радиационных условиях на ускорителях. Обоснована актуальность и сформулированы цели диссертационной работы. Кратко излагаются основные результаты, которые выносятся на защиту. Приводится список основных конференций и совещаний, где прошла апробация данной работы.

**Первая глава** содержит выбор и обоснование выбранной методики исследования радиационной стойкости датчиков Холла. Основным методом изучения характеристик датчиков магнитного поля в радиационных условиях был выбран метод сравнительного анализа характеристик образцов до и после облучения. Основные эксперименты были проведены на магнитокалибровочных стендах ЛФЧ и импульсном реакторе быстрых нейтронов ИБР-2 (ЛНФ, ОИЯИ). Кроме того, испытания прототипа магнитометрической аппаратуры в комплекте с отобранными радиационно-стойкими ДХ проводились на экспериментальной установке КОМБАС на ускорителе У – 400 М (ЛЯР, ОИЯИ).

Приведена схема этапов работ по исследованию радиационной стойкости ДХ на стендах ОИЯИ (Рис. 1):

1. Облучение образцов на реакторе ИБР-2 ОИЯИ быстрыми нейтронами со средней энергией  $\langle E \rangle = 1.35$  МэВ при различных значениях флюенсов от  $10^{13}$  до  $10^{16}$  н/см<sup>2</sup>. Эти значения флюенсов соответствуют расчетным данным по нейтронному фону большинства современных детекторов.
2. Хранение облученных образцов осуществлялось при температуре  $-10^{\circ}$  С с целью исключения возможного отжига радиационных дефектов в образцах до момента их исследования на стенде.
3. Повышение абсолютной чувствительности ДХ на порядок за счет запитки их импульсным ( $\tau = 0.5$  мс) током с амплитудой  $I = 10 \times I_{ном}$ .
4. Исследование параметров ДХ при постоянной температуре  $t = +25^{\circ}$  С ( $\pm 0.1^{\circ}$ ) до и после облучения.
5. Абсолютная калибровка ДХ в единицах магнитного поля на магнитокалибровочном стенде с использованием эталонного прибора ЯМР-магнитометра, который позволял фиксировать значение магнитного поля в однородной области с абсолютной точностью не хуже 0.001%.
6. Установка кассеты с ДХ и ЯМР пробником в одну и ту же точку однородной области магнитного поля до и после облучения с точностью не хуже 0.1 мм с помощью специального координатного механизма.
7. Многократное повторение исследования ДХ после облучения для выявления скорости восстановления изначальных параметров ДХ.

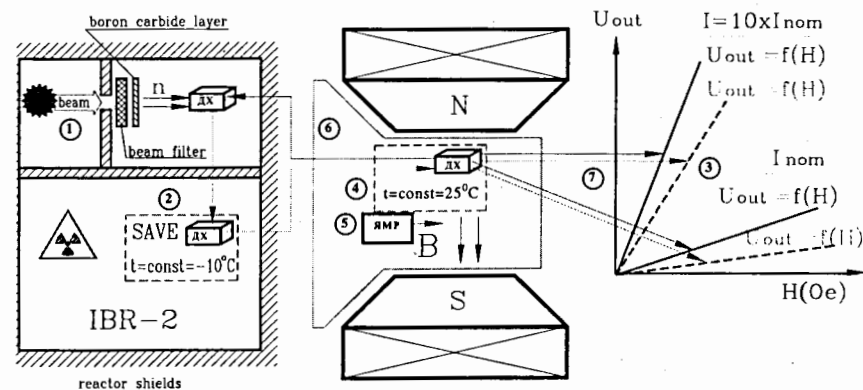


Рис. 1. Схема этапов работ по тестированию ДХ.

8. По результатам экспериментов выработывались следующие рекомендации:
  - a) по изменению структуры как чувствительной области пластины датчика, его подложки, так и подводящих проводов и способов их крепления к контактным точкам на пластине ДХ;
  - b) по изменению режимов облучения образцов на облучательных установках в соответствии с конкретным типом испытуемых образцов;
  - c) по изменению режимов калибровки экспериментальных ДХ на магнитокалибровочном стенде до и после облучения.
9. Проведены испытания прототипа магнитометрической аппаратуры в комплекте с отобранными радиационно-стойкими ДХ на экспериментальной установке КОМБАС на ускорителе У – 400 М (ЛЯР, ОИЯИ).

**Во второй главе** приведены параметры «теплого» магнитокалибровочного стенда, предназначенного для исследования параметров ДХ до и после облучения в магнитных полях до 2 Тл (Рис. 2). Его основой являлся Ш-образный постоянный электромагнит, который запитывался постоянным стабильным током до 200 А с плавной регулировкой его значения. Параметры более 400 облученных образцов датчиков магнитного поля были исследованы на стенде при различных уровнях магнитного поля, при этом были обеспечены следующие условия проведения экспериментов:

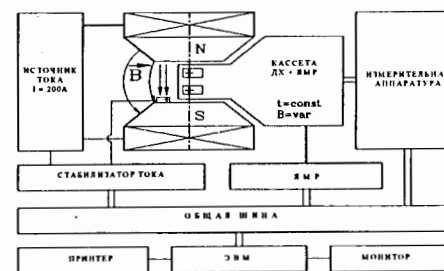
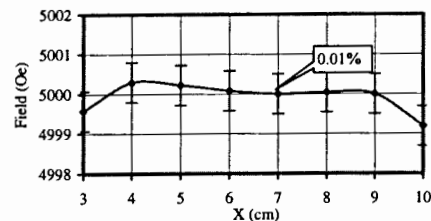


Рис. 2. Блок-схема стенда (2Тл).

1. Образцовое ( $B_{обр}$ ) магнитное поле в рабочем воздушном зазоре магнита могло плавно изменяться от 0 до 2 Тл.

- Однородность магнитного поля  $B_{обр}$  в центральной части зазора (рабочий объем с  $\varnothing 50$  мм и высотой до 30 мм) обеспечивалась на уровне 0.01 %/см (Рис. 3) во всем диапазоне магнитных полей до 2 Тл.
- Контроль и индикация образцового магнитного поля  $B_{обр}$  в рабочем объеме осуществлялись с помощью прецизионного ЯМР-магнитометра с высокой абсолютной точностью измерения магнитного поля (0.001% от  $B_{обр}$ ) производства фирмы METROLAB.
- Прецизионное 3<sup>x</sup> – координатное приводное устройство обеспечивало перемещение и фиксацию испытуемых образцов ДХ в рабочем зазоре магнита с точностью ~ 0.1 мм.



Таким образом, все перечисленное выше обеспечивало высокую относительную точность (~ 0.01 %) многократного повторения условий эксперимента на «теплом» магнитокалибровочном стенде при исследовании характеристик датчиков магнитного поля до и после облучения.

Рис. 3. Распределение магнитного поля по оси зазора магнита

**В третьей главе** приведены параметры сверхпроводящего магнитокалибровочного стенда, предназначенного для исследования параметров ДХ до и после облучения в магнитных полях до 5 Тл (Рис. 4). Его основой являлся сверхпроводящий соленоид, который запитывался постоянным стабильным током до 150 А с плавной регулировкой его значения.

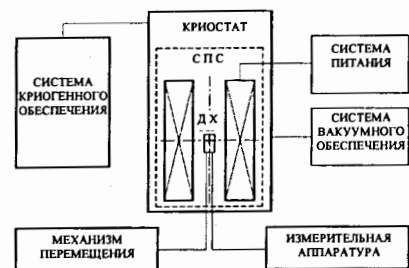


Рис. 4. Структурная схема сверхпроводящего стенда

В результате модернизации сверхпроводящего магнитокалибровочного стенда ЛФЧ для проведения прецизионных испытаний радиационной стойкости ДХ в магнитных полях до 5 Тл были получены следующие параметры:

- Максимальное рабочее магнитное поле  $B_{обр}$  ..... 5 Тл.
- Однородность магнитного поля  $B_{обр}$  в рабочем объеме (~ 60 см<sup>3</sup>) (Рис. 5) ..... ~ 0.001 %/см.
- Абсолютная точность контроля и индикации образцового магнитного поля  $B_{обр}$  в рабочем объеме ЯМР-магнитометром ... 0.001 %.
- Координатный механизм обеспечивал:
  - перемещение пробника по оси соленоида  $Z = \pm 200$  мм относительно центра рабочей области с точностью .....  $\pm 0.1$  мм;
  - перемещение пробника по радиусу от 0 до 35 мм с точностью ..  $\pm 0.1$  мм;
  - вращение по углу от 0° до 360° с точностью ..... ~ 0.5°.
- Долговременная стабильность  $B_{обр}$  (8 часов) ..... 0.005%
- Источник тока ..... 0 ÷ 150 А
- Скорость изменения тока ..... 0.05 ÷ 1 А/сек

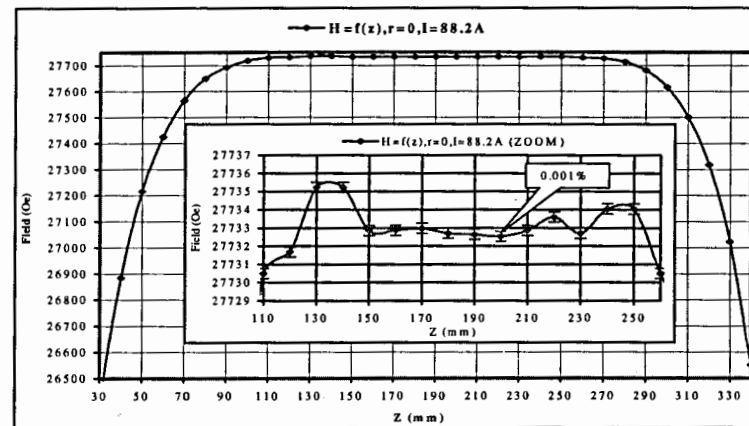
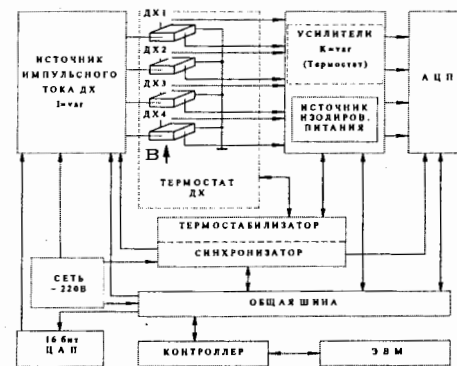


Рис. 5. Распределение магнитного поля по оси соленоида

Таким образом, все перечисленное выше обеспечивало высокую абсолютную точность (~ 0.01 %) многократного повторения условий эксперимента на сверхпроводящем магнитокалибровочном стенде в полях до 5 Тл при исследовании радиационной стойкости датчиков магнитного поля.

**В четвертой главе** приведены параметры измерительной аппаратуры, с помощью которой на магнитокалибровочных стендах ОИЯИ измерялись характеристики датчиков магнитного поля до и после облучения. В первую очередь рассматривались требования, предъявляемые к измерительной аппаратуре при экспериментах подобного рода. Эти требования главным образом определялись



большим количеством испытуемых образцов (более 400), которые были исследованы в течении длительного времени (3 года) с максимально достижимой точностью (до 0.02%). При этом надо отметить, что образцы отличались размерами чувствительной области и подложки, материалами, из которых они были изготовлены, номинальными токами питания, чувствительностью, допустимой рассеиваемой мощностью и прочим.

Рис. 6. Блок-схема измерительной аппаратуры

Изготовленная аппаратура (Рис. 6) в условиях магнитометрического стенда позволяла проводить разнообразные испытания датчиков магнитного поля и контролировать изменение основного параметра ДХ – калибровочной кривой до и после облучения ДХ.

Основные характеристики системы:

- Количество независимых измерительных каналов ..... 4.
- Точность относительных измерений параметров ДХ ..... (0.05 ÷ 0.02) %.

3. Диапазон магнитных полей (с тремя поддиапазонами) ...  $B = (0 \div 5)$  Тл.
4. Диапазон изменения токов питания ДХ .....  $I = 0 \div 10 I_{ном}$ , т.е.  $(0 \div 1)$  А.
5. Температура термостабилизации:
  - кассеты с ДХ .....  $t = +25^{\circ} \text{C} (\pm 0.1^{\circ})$ ;
  - электроника .....  $t = +35^{\circ} \text{C} (\pm 0.1^{\circ})$ .
6. Точность установки кассеты с ДХ в фиксированное положение центральной части электромагнита .....  $\sim 0.1$  мм.

**В пятой главе** приведены результаты исследований параметров микродатчиков Холла на магнитокалибровочных стендах до и после облучения. Исследования радиационной стойкости датчиков магнитного поля проводились в основном на микродатчиках Холла, изготовленных в ГУ «ЛП» (г. Львов, Украина) из дискретных микрокристаллов на основе традиционных полупроводниковых материалов III-V. Более 400 образцов такого типа датчиков были исследовано.

Кроме того, исследовались на радиационную стойкость следующие типы датчиков магнитного поля:

1. Промышленные датчики Холла типа ПХЭ605 (г. С-Петербург, а/о «Магнетон»). Данный тип датчиков является наиболее распространенным в магнитометрической аппаратуре в России.
2. Полевые датчики Холла, изготовленные на основе современной полупроводниковой интегральной технологии «кремний на изоляторе» в ИПТМ РАН (г. Черноголовка, Россия).
3. Высокостабильные датчики магнитного поля, созданные в ШФИТ (г. Лозанна, Швейцария).

Последние 3 типа датчиков магнитного поля исследовались в ограниченном количестве (не более 10 образцов каждого типа). Это связано с тем, что по результатам испытаний этих датчиков не было возможности изменять их структуру, а это значит, нельзя было изменять их радиационные характеристики, как отмечено в первой главе. Тем не менее, эти данные были важны для общей оценки радиационной стойкости как наиболее применяемых в России датчиков из г. С-Петербурга, так и наиболее современных и перспективных разработок датчиков магнитного поля из г. Черноголовки и г. Лозанна.

При первых испытаниях выяснилось, что наведенная активность на контакты ДХ гораздо больше, чем наведенная активность на чувствительную область ДХ. Спектрометрический анализ показал, что основной вклад в наведенную активность давали серебро или золото, которые использовались для изготовления контактов ДХ. По результатам экспериментов были выработаны рекомендации по изменению конструкции датчиков. Было рекомендовано, во-первых, заменить серебро и золото оловом, во-вторых, на этапе исследований перейти на бескорпусные датчики, тем самым, исключив возможные негативные влияния материала корпуса датчика на результаты измерений. После перехода на использование олова, в качестве контактов, суммарная наведенная активность существенно уменьшилась и в основном определялась материалом ДХ и интенсивностью облучения.

На первом этапе каждый датчик исследовался на возможность запитки импульсным током ( $\tau=0.5$ мс) повышенной амплитуды от  $I_{ном}$  до  $10 \times I_{ном}$  до и после облучения (Рис.7а). Затем измерялась зависимость выходного напряжения от значения магнитного поля при данном токе ДХ ( $10 \times I_{ном}$ ), так называемая, калибровочная кривая (Рис.7б).

После облучения датчики устанавливались на прежнее место в однородной области магнитного поля, процедура измерения повторялась и результаты сравнивались.

Далее исследования проводились по следующей схеме. Первую неделю после облучения измерения на магнитокалибровочном стенде проводились ежедневно. Затем интервал между измерениями увеличивался. Тем самым изучалось изменение чувствительности облученного ДХ со временем. До облучения долговременная стабильность параметров ДХ, как правило, была на уровне точности измерительной аппаратуры, т.е.  $\sim 0.05\%$ .

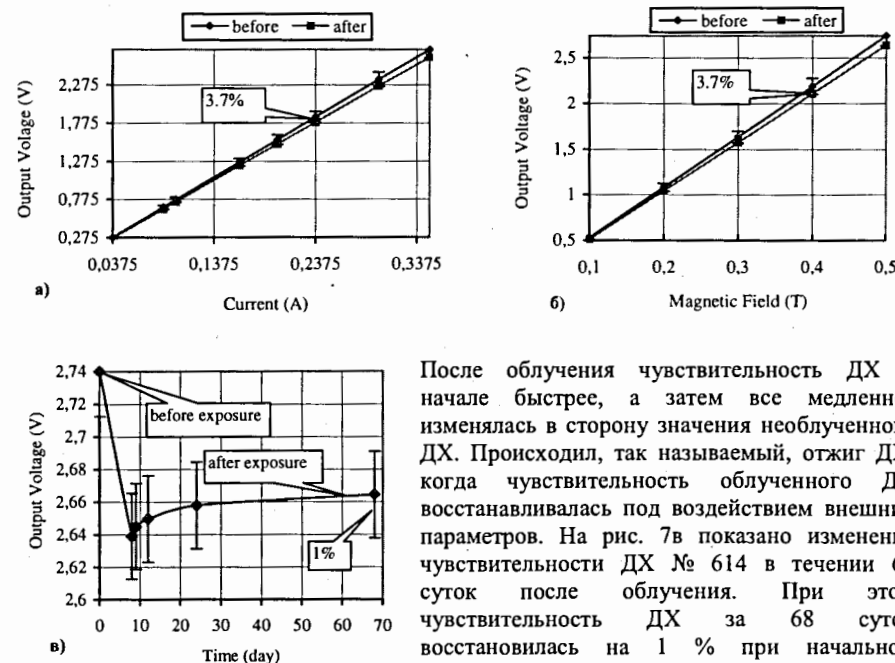


Рис. 7. Зависимость выходного напряжения для ДХ № 614 до и после облучения: а) от тока питания; б) от значения магнитного поля; в) от времени после облучения.

После облучения чувствительность ДХ в начале быстрее, а затем все медленнее изменялась в сторону значения необлученного ДХ. Происходил, так называемый, отжиг ДХ, когда чувствительность облученного ДХ восстанавливалась под воздействием внешних параметров. На рис. 7в показано изменение чувствительности ДХ № 614 в течении 68 суток после облучения. При этом чувствительность ДХ за 68 суток восстановилась на 1 % при начальном изменении на 3.7 %.

В случае с исследованием радиационной стойкости прецизионных ДХ, изготовленных в ШФИТ (г. Лозанна, Швейцария), была выбрана другая схема. Датчики были облучены быстрыми нейтронами с флюенсом от  $10^{17}$  н/м<sup>2</sup> до  $10^{19}$  н/м<sup>2</sup>. Измерения чувствительности ДХ до и после облучения проводились как в ЛФЧ, так и в ШФИТ. При этом чувствительность облученных ДХ увеличилась в среднем на несколько процентов. После этого датчики нагревались до  $420^{\circ} \text{C}$  в течении 30 минут, т.е. внешним воздействующим параметром здесь была температура. После чего параметры ДХ восстанавливались в нормальное состояние (до облучения) и сохраняли это состояние после снятия воздействия температуры.

В результате многочисленных (более 400) экспериментов с микродатчиками магнитного поля проводился отбор не ДХ, а выбор технологии изготовления наиболее перспективных ДХ с точки зрения их радиационной стойкости. Такая эволюция технологии изготовления ДХ проиллюстрирована на рис. 8, где показаны калибровочные кривые для датчиков № 650-4а и № 568-2с до и после облучения быстрыми нейтронами с флюенсом  $1.4 \times 10^{18}$  н/м<sup>2</sup>. В результате облучения чувствительность уменьшилась для ДХ № 650-4а на 3.5%, а для ДХ № 568-2с на 0.2 %.

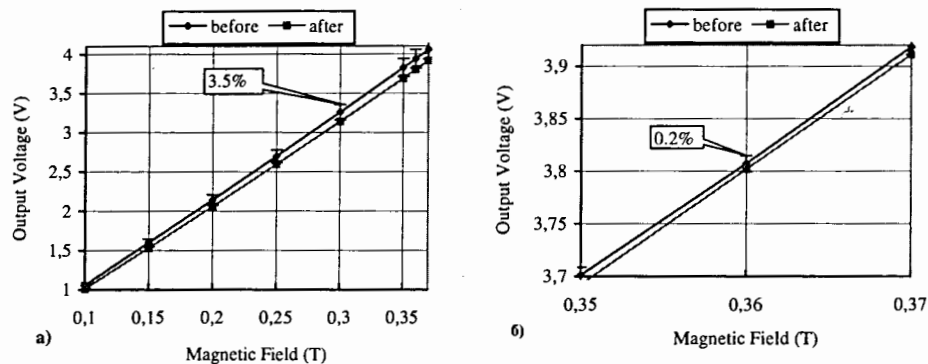


Рис. 8. Зависимость выходного напряжения от значения магнитного поля до и после облучения: а) ДХ № 650-4а; б) ДХ № 568-2с.

Таким образом, по результатам экспериментов на стендах ОИЯИ с образцами микродатчиков Холла была отработана оптимальная технология изготовления радиационно-стойких ДХ в ГУ «ЛП» (г. Львов, Украина). В результате эволюции технологии изготовления ДХ было достигнуто значительное улучшение радиационной стойкости ДХ. Точность измерения магнитного поля при радиационной нагрузке была увеличена, как минимум, на порядок по сравнению с тем, что было до начала экспериментов. В начале исследований изменение чувствительности ДХ при облучении быстрыми нейтронами с флюенсом  $F \sim 10^{18} \text{ н/м}^2$  было на уровне единиц процентов. В результате исследований этот параметр уменьшился на порядок и составил не более 0.2% при облучении быстрыми нейтронами с флюенсом  $F = 1.4 \times 10^{18} \text{ н/м}^2$ .

**В шестой главе** приведены результаты исследований влияния нейтронного облучения на параметры полевых датчиков Холла. В данном случае исследуемым объектом был новый тип магнитосенсора, так называемый, полевой датчик Холла (ПДХ), сочетающий способность преобразования магнитного поля в электрический сигнал с возможностью усиления этого сигнала.

Три группы ПДХ облучались быстрыми нейтронами с энергией от 0.1 до 25 МэВ и с флюенсом  $1.3 \cdot 10^{16} \text{ н/м}^2$ ,  $1.3 \cdot 10^{17} \text{ н/м}^2$  и  $1.3 \cdot 10^{18} \text{ н/м}^2$  соответственно на реакторе ИБР-2 ОИЯИ. Средняя энергия нейтронов составляла  $\langle E \rangle = 1.35 \text{ МэВ}$ . Во время облучения ПДХ находились в пассивном режиме (т.е. напряжение на электродах питания и управляющих затворах было равно нулю) и размещались в кадмиевых и свинцовых контейнерах. Доза сопутствующего гамма-фона составляла от  $10^3$  до  $10^5$  рад при равномерном спектре.

Измерения характеристик облученных ПДХ проводились периодически: сразу после облучения, затем каждый день в течении недели и, наконец, раз в неделю в течении 73 суток. Перед первым измерением датчики хранились при температуре  $t = -10^\circ\text{C}$  до снижения уровня наведенной активности до санитарной нормы. В перерыве между измерениями датчики выдерживались при комнатной температуре.

Характерные экспериментальные зависимости выходного напряжения ПДХ № 53 от уровня магнитного поля при различных режимах включения датчика магнитного поля (режимы генератора тока и генератора напряжения) до и после облучения нейтронами с флюенсом  $F = 1.3 \cdot 10^{18} \text{ н/м}^2$  и средней энергией  $\langle E \rangle = 1.35 \text{ МэВ}$  показаны на рисунке 9.

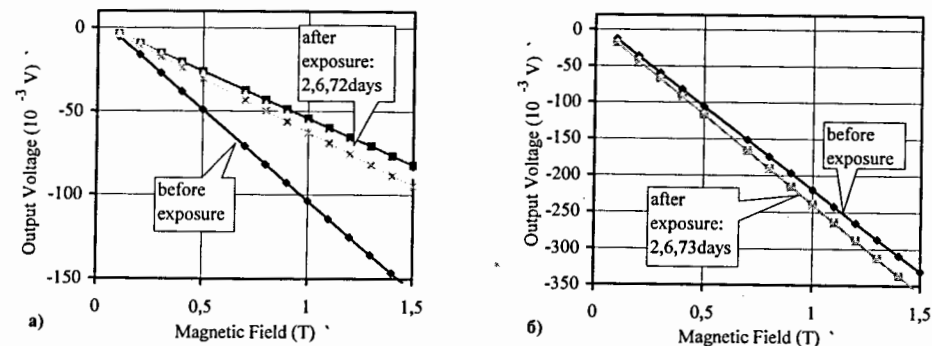


Рис.9. Зависимость выходного напряжения от уровня магнитного поля (ПДХ № 53) до и после облучения ( $F = 1.3 \cdot 10^{18} \text{ н/м}^2$ ): а) режим генератора тока, б) режим генератора напряжения.

Анализ подобных кривых, полученных для 8 ПДХ, позволил сделать следующие выводы:

1. Во всех случаях нейтронное облучение приводит к изменению магнитной чувствительности ПДХ. При этом, если в режиме генератора тока чувствительность облученного датчика возрастала, то в режиме генератора напряжения – падала.
2. Кроме того, в режиме генератора напряжения относительное изменение чувствительности ПДХ до и после облучения несколько возрастало с ростом дозы облучения. На рис. 10 показано изменение разности выходного напряжения ПДХ до и после облучения при различных дозах облучения в магнитном поле  $B = 1.5 \text{ Тл}$  для режима генератора напряжения.
3. По мере выдержки облученных ПДХ при комнатной температуре магниточувствительный сигнал несколько изменялся, стремясь к исходному значению, но не достигал его за время, равное 73 суткам.
4. Облучение нейтронами и сопутствующим гамма-фоном не изменяло линейной зависимости сигнала ПДХ от величины магнитного поля.

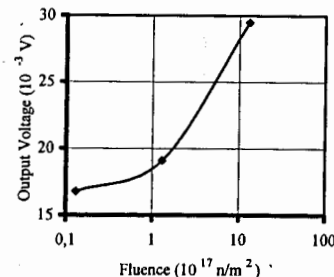


Рис. 10. Зависимость относительного изменения чувствительности ПДХ от дозы облучения в режиме генератора напряжения ( $B = \text{const} = 1.5 \text{ Тл}$ )

Таким образом, впервые было исследовано влияние облучения реакторными нейтронами (флюенс  $F = 10^{16} \div 10^{19} \text{ н/м}^2$ ; средняя энергия  $\langle E \rangle = 1.35 \text{ МэВ}$ ) на чувствительность датчиков магнитного поля нового типа, полевой датчик Холла, в широком диапазоне магнитных полей ( $B = 0 \div 1.5 \text{ Тл}$ ) на стендах ОИЯИ. Результаты экспериментов показали, что режимы генератора тока и генератора напряжения в схеме включения ПДХ приводят к противоположным изменениям чувствительности ПДХ после облучения. Это значит, что не только выбором технологии изготовления ПДХ, но и схемой его включения можно сохранить постоянство его основной функции, магниточувствительности, в широком диапазоне доз радиационных воздействий.



**В седьмой главе** приведены результаты первого эксперимента (Рис. 11) по мониторингу магнитного поля в радиационных условиях на ускорителе. Такие испытания прототипа магнитометрической аппаратуры в комплекте с отобранными радиационно-стойкими ДХ проводились на экспериментальной установке КОМБАС на ускорителе У-400 М. Исследуемые датчики магнитного поля располагались в зазоре магнитов в непосредственной близости от вакуумной камеры, где находился пучок частиц. Сигнал с датчиков поступал на измерительную аппаратуру, которая располагалась за радиационной защитой в 10 метрах от активной зоны ускорителя. Продолжительность эксперимента составила 104 часа.

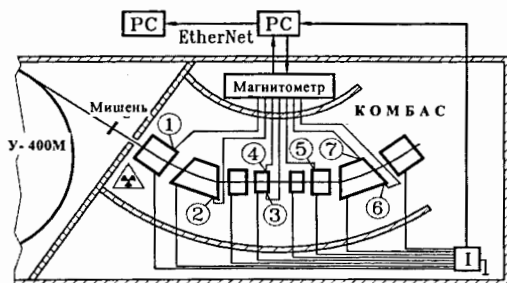


Рис. 11. Блок-схема эксперимента.

Мониторинг магнитного поля осуществлялся 8-канальным магнитометром в режиме реального времени. Управление измерительной аппаратурой и предварительная обработка данных осуществлялись ЭВМ в экспериментальном зале. Одновременно данные передавались на центральную ЭВМ на пульт управления экспериментом по линии RS232 и далее с выходом на EtherNet. Здесь данные мониторинга магнитного поля ставились в соответствие с данными измерения радиационного поля и режимов работы сепаратора (измерение тока и поля магнитов).

В качестве исследуемых датчиков магнитного поля использовались 6 изготовленных по отработанной нами технологии радиационно-стойких датчиков Холла (ГУ «ЛП», г. Львов) и 2 промышленных датчика Холла типа ПХЭ605 (г. С-Петербург, а/о «Магнетон»). Промышленные датчики из г. С-Петербурга были базовыми для данной схемы магнитометра, имели максимально возможную стабильность и относительную точность измерения магнитного поля. Поэтому 2 последних ДХ (ПХЭ605) использовались в качестве контрольных датчиков. Во время эксперимента 6 основных ДХ и 1 контрольный ДХ располагались в зазорах магнитов сепаратора в радиационных условиях в точках максимально близких к вакуумной камере с пучком. Второй контрольный ДХ не облучался и использовался на магнитокалибровочном стенде в качестве опорного. Его роль заключалась в контроле за постоянством усилительного тракта измерительной аппаратуры до и после проведения эксперимента на сепараторе. Это обеспечивало неизменность внешних условий при калибровке ДХ на магнитокалибровочном стенде в эталонном магнитном поле до и после облучения. Все ДХ были термостабилизированы при  $t = + 25 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0.2^\circ$ . По результатам калибровки относительная точность измерения магнитного поля для основных 6 измерительных каналов составила 0.05 %, а для двух контрольных – 0.02 %.

Таблица 1: Результаты мониторинга радиационного поля в экспериментальных точках.

№ позиции ДХ в радиац. зоне	Флюенс гамма-квантов (г/м <sup>2</sup> )	Флюенс нейтронов (н/м <sup>2</sup> )	
		0-4.3 МэВ	4.3-10 МэВ
1(контрольный ДХ)	3.2x10E9	6.0x10E14	1.1x10E16
2 (базовый ДХ №3)	2.1x10E8	2.6x10E13	1.6x10E15
3 (базовый ДХ №1)	2.6x10E7	2.1x10E13	9.9x10E13
4 (базовый ДХ №2)	7.6x10E7	5.2x10E13	3.8x10E14
5 (базовый ДХ №5)	1.1x10E7	9.3x10E12	5.5x10E13
6 (базовый ДХ №4)	2.4x10E7	8.0x10E12	9.6x10E13
7 (базовый ДХ №6)	2.7x10E7	6.8x10E12	9.6x10E13

В местах расположения датчиков магнитного поля в зазорах магнитного сепаратора помещались группы детекторов, которые измеряли интегральное значение излучения во время эксперимента для каждого из 7 датчиков отдельно (Табл. 1).

В течении эксперимента в каждой из экспериментальных точек (Рис.11) измерено и обработано порядка  $3 \times 10^5$  значений магнитного поля в режиме реального времени. Результаты мониторинга магнитного поля в экспериментальных точках с 1 по 7 фиксировались на фоне практически равномерного накопления дозы облучения для каждого из датчиков магнитного поля в отдельности.

На рис. 12а) и 12б) показаны графики изменения чувствительности основных экспериментальных датчиков Холла при минимальной (ДХ № 6) и максимальной (ДХ № 3) дозах облучения (Табл. 1).

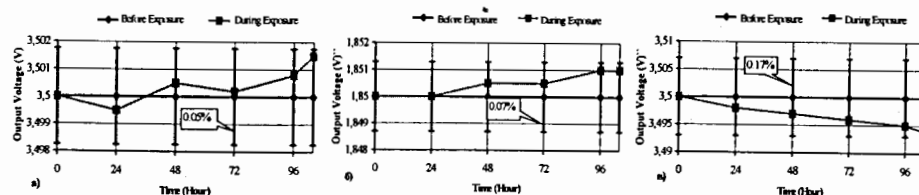


Рис. 12. Зависимость выходного напряжения ДХ от времени в процессе облучения: а) ДХ № 6 (при  $B=1.45\text{Tл}$ ); б) ДХ № 3 (при  $B=0.8\text{Tл}$ ); в) контрольный ДХ (при  $B=1.5\text{Tл}$ )

Из графиков видно, что при наименьшей дозе облучения чувствительность ДХ № 6 изменилась на 0.05 % от первоначального значения. При максимальной дозе в конце эксперимента изменение чувствительности для ДХ № 3 составило 0.07 % от первоначального значения.

Для остальных экспериментальных ДХ (№№ 1, 2, 4, 5) зависимость чувствительности от дозы облучения была такая же, как и для ДХ № 3 и ДХ № 6.

На рисунке 12в) показан график изменения чувствительности контрольного ДХ при накоплении дозы облучения в магнитном поле  $B = 1.5 \text{ Тл}$ . В конце эксперимента (при максимальной дозе облучения данного датчика) изменение чувствительности контрольного ДХ составило 0.17 % от первоначального значения до облучения. После окончания эксперимента аппаратура повторно калибровалась на магнитокалибровочном стенде в ЛФЧ. Данные калибровки на магнитокалибровочном стенде показали, что изготовленные по специальной технологии радиационностойкие датчики Холла изменили свою чувствительность в среднем на 0.05 % за время эксперимента в течении 104 часов, что соответствует полученным результатам в процессе эксперимента (Рис. 12). Облученный контрольный датчик Холла за это же время изменил свою чувствительность на 0.15 %. При этом необлученный контрольный датчик Холла (ПХЭ605), который контролировал идентичность условий калибровки на магнитокалибровочном стенде до и после эксперимента, не изменил своей чувствительности (в пределах относительной точности калибровки для данного датчика – 0.02%).

Таким образом, по результатам экспериментов в ОИЯИ с образцами ДХ (главы 5, 6) была отработана оптимальная технология изготовления радиационно-стойких ДХ в ГУ «ЛП» (г. Львов, Украина). Используя эти радиационно-стойкие ДХ был проведен эксперимент по мониторингу магнитного поля в радиационных условиях реального эксперимента в течении 104 часов на установке КОМБАС на ускорителе У – 400М в ЛЯР ОИЯИ (г. Дубна, Россия). В течении эксперимента по мониторингу магнитного поля в различных экспериментальных точках установки КОМБАС флюенс радиационного поля составил:

для гамма-фона –  $F = 1.1 \times 10^7 \div 3.2 \times 10^9 \text{ г/м}^2$ ;  
для нейтронов –  $F = 6.43 \times 10^{13} \div 1.16 \times 10^{16} \text{ н/м}^2$ , при  $E = 0 \div 10 \text{ МэВ}$ .

При этом, суммарная относительная точность мониторинга магнитного поля при максимально достигнутых дозах облучения ДХ в процессе эксперимента составила: Для промышленного ДХ (ПХЭ605, г. С-Петербург, а/о «Магнетон») – 0.17%. Для отобранных радиационно-стойких ДХ (ГУ «ЛП», г. Львов) – 0.07 %.

**В заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы:

1. Создан комплекс оборудования для исследования радиационной стойкости датчиков магнитного поля, состоящий из измерительной аппаратуры, калибровочных и облучательных стендов, механизмов перемещения датчиков магнитного поля на стендах. При этом характеристики датчиков магнитного поля до и после облучения измерялись с относительной точностью  $\sim 0.05 \div 0.02$  %. Кроме того, обеспечивалась высокая относительная точность ( $\sim 0.01$  %), а для сверхпроводящего стенда и абсолютная точность ( $\sim 0.01$  %), многократного повторения условий эксперимента на «теплом» и «холодном» магнитокалибровочных стендах до 5 Тл при исследовании радиационной стойкости датчиков магнитного поля.
2. Впервые получены результаты исследований радиационной стойкости микродатчиков Холла на базе традиционных полупроводниковых материалов III-V, изготовленных в Государственном Университете «Львовская Политехника» (ГУ «ЛП», г. Львов, Украина), при облучении быстрыми нейтронами со средней энергией  $\langle E_n \rangle = 1.3$  МэВ и с флюенсом от  $10^{14}$  до  $10^{20}$  н/м<sup>2</sup> на стендах ОИЯИ.
3. Впервые получены результаты исследований радиационной стойкости полевых датчиков Холла, изготовленных на основе современной полупроводниковой интегральной технологии («кремний на изоляторе») в Институте Проблем Технологии Микроэлектроники и Особо Чистых Материалов Российской Академии Наук (ИПТМ РАН, г. Черноголовка, Россия), при облучении быстрыми нейтронами с энергией от 0.1 до 25 МэВ и с флюенсом от  $10^{16}$  до  $10^{18}$  н/м<sup>2</sup> на стендах ОИЯИ.
4. Впервые получены результаты исследований радиационной стойкости Вертикальных датчиков Холла, изготовленных по технологии биполярных интегральных схем в Швейцарском Федеральном Институте Технологии (ШФИТ, г.Лозанна, Швейцария) при облучении быстрыми нейтронами со средней энергией  $\langle E_n \rangle = 1.3$  МэВ и с флюенсом от  $10^{17}$  до  $10^{19}$  н/м<sup>2</sup> на стендах ОИЯИ и ШФИТ.
5. Впервые получены результаты исследований радиационной стойкости промышленных датчиков Холла типа ПХЭ605 (г. С-Петербург, а/о «Магнетон») для флюенса нейтронов  $F = 1.16 \times 10^{16}$  н/м<sup>2</sup> с энергией  $E = 0 \div 10$  МэВ.
6. Впервые предложены и реализованы экспериментальные методы по исследованию:
  - характеристик датчиков магнитного поля на магнитокалибровочных стендах ЛФЧ до и после облучения быстрыми нейтронами со средней энергией  $\langle E \rangle = 1.35$  МэВ при различных значениях флюенсов от  $10^{17}$  до  $10^{20}$  н/м<sup>2</sup> на реакторе ИБР-2 ОИЯИ. При этом было исследовано более 400 образцов датчиков магнитного поля и были сформулированы рекомендации по совершенствованию технологии изготовления радиационностойких датчиков магнитного поля;
  - радиационной стойкости датчиков Холла в реальных условиях эксперимента в течении одного сеанса длительностью 104 часа на ускорителе У-400М (ЛЯР, ОИЯИ) при флюенсе гамма-излучения в диапазоне  $10^7 \div 10^9$  г/м<sup>2</sup> и флюенсе нейтронов –  $10^{13} \div 10^{16}$  н/м<sup>2</sup>, при энергии  $E = 0 \div 10$  МэВ. При этом, суммарная относительная точность мониторинга магнитного поля при этих максимально достигнутых дозах облучения ДХ в процессе эксперимента составила:
    - а) для промышленного ДХ (ПХЭ605, г. С-Петербург, а/о «Магнетон») – 0.17%,
    - б) для отобранных радиационностойких ДХ (ГУ «ЛП», г. Львов) – 0.07 %.

7. В результате проведенных экспериментов было достигнуто улучшение радиационной стойкости ДХ на порядок по сравнению с тем, что было до начала экспериментов. В начале исследований изменение чувствительности ДХ при облучении быстрыми нейтронами с флюенсом  $F \sim 10^{18}$  н/м<sup>2</sup> было на уровне единиц процентов. В результате исследований этот параметр уменьшился на порядок и составил не более 0.2% при облучении быстрыми нейтронами с флюенсом  $F = 1.4 \times 10^{18}$  н/м<sup>2</sup>.

**Диссертация основывается на следующих опубликованных работах :**

1. В. М.Лачинов, В.К.Маковеев, «Устройство для измерения мгновенных значений магнитных полей», Авт. Свид. № 559199, Бюл. ОИПОТЗ, № 19, с.127, 1977.
2. В.М.Лачинов, В.К.Маковеев, Н.В.Клоков, «Аппаратура для магнитных измерений в ускоряющей системе прототипа коллективного ускорителя тяжелых ионов», Приборы и Техника Эксперимента, Москва-1980, № 5, с. 34-39.
3. I.Bolshakova, N.Zamyatin, I.Izhnin, A.Izhnin, S.Krukovsky, V.Makoveev, "Influence of the Fast Neutrons Radiation on the Properties of the Epitaxial Layers CaAs, Doped Al and Yb", Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Conference VITT-97, Minsk, September, 1997.
4. I.Bolshakova, N.Zamyatin, I.Izhnin, V.Makoveev, A.Matkovsky, T.Moskovets, «Influence of the Radiation by Fast Neutrons on the Properties of Microcrystals InAs and InSb», Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Conference VITT-97, Minsk, September, 1997.
5. I.Bolshakova, M.Bolshakov, V.Makoveev, T.Moskovets, N.Zamyatin, "The Investigation of the Magnetic Field Microsensor Radiation Hardness", Proceedings of the 15<sup>th</sup> International Magnet Technology Conference (MT-15), Beijing, China, October 1997, pp. 1489-1491.
6. I.Bolshakova, M.Bolshakov, V.Makoveev, A.Matkovski, T.Moskovets, N.Zamyatin, "Stability of the Magnetic Microsensors under Effect of Ionizing Irradiation", Proceedings of the EUROSENSOR-12 Conference, Southampton, England, September, 1998.
7. A.V.Karpukhin, S.I.Kukarnikov, V.M.Lachinov, V.K.Makoveev, "Magnetic Calibration Stand (2T) for Testing of Irradiation Influence on Magnetic Field Sensors", Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Magnet Measurement Workshop (IMMW-11), BNL, Upton, NY, USA, September, 1999.
8. N.I.Balalykin, A.V.Karpukhin, S.I.Kukarnikov, V.M.Lachinov, V.K.Makoveev, V.G.Shabratov, "Magnetic Calibration Stand (5T)", Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Magnet Measurement Workshop (IMMW-11), BNL, Upton, NY, USA, September, 1999.
9. V.K.Makoveev, I.A.Bolshakova, M.M.Bolshakov, A.V.Karpukhin, V.M.Lachinov, A.O.Matkovski, T.A.Moskovets, N.I.Zamiatin, "Neutron Irradiation Influence on Magnetic Field Sensors", IEEE Transactions On Applied Superconductivity, Vol. 10, No. 1, March 2000, pp.1407-1409.
10. V.P.Goncharov, A.V.Leonov, V.K.Makoveev, V.N.Mordkovich, M.M.Filatov, "Neutron Irradiation Influence on Field Hall Plates", Proceedings of the Conference «Radiation Hardness of Electronic Systems» («Hardness-99»), Lytkarino, Moscow Region, Russia, June, 1999.
11. V. K. Makoveev, A. G. Artukh, A. V. Karpukhin, V. M. Lachinov, I.A.Bolshakova, "The Magnetic Field Monitoring of the COMBAS Separator Under Radiation Conditions", Proceedings of the 7<sup>th</sup> European Particle Accelerator Conference (EPAC-2000), Vienna, Austria, June, 2000, pp. 1853-1855.
12. V.K. Makoveev, V.P. Goncharov, M.M. Filatov, A.V. Karpukhin, V.M. Lachinov, A.V. Leonov, V.N. Mordkovich, "Influence of Neutron Irradiation on the Parameters of Field Hall Plates", IEEE Transactions On Applied Superconductivity, Vol. 12, No. 1, March 2002, pp.1672-1674.