

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На правах рукописи

ИВАНОВ

Евгений Владимирович

СИСТЕМА ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ПЕРЕХОДА В  
НОРМАЛЬНО-ПРОВОДЯЩУЮ ФАЗУ  
СВЕРХПРОВОДЯЩИХ МАГНИТОВ УСКОРИТЕЛЬНОГО  
КОМПЛЕКСА НУКЛОТРОН

**Специальность: 01.04.20 – физика пучков  
заряженных частиц и ускорительная техника**

*Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук*

**Дубна 2015**

Работа выполнена в Лаборатории физики высоких энергий им. В.И.Векслера и  
А.М.Балдина Объединенного института ядерных исследований

Научный руководитель:

Кандидат физико-математических наук

А. О. Сидорин

Официальные оппоненты:

Н. Н. Алексеев, доктор физико-математических наук,

НИЦ «Курчатовский институт» ФГБУ «Государственный научный центр РФ  
Институт теоретической и экспериментальной физики» имени А.И.Алиханова,  
начальник Ускорительного центра ФГУП "ГНЦ РФ ИТЭФ"

Д. Е. Беркаев, кандидат физико-математических наук,

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт  
ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии  
наук, старший научный сотрудник.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение  
«Государственный научный центр Российской Федерации - Институт физики  
высоких энергий», г. Протвино

Защита диссертации состоится \_\_\_\_\_ 2015 г.

в “\_\_\_\_\_” часов на заседании диссертационного совета Д 720.001.02  
в Объединенном институте ядерных исследований, г.Дубна, Московской  
области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Объединенного института  
ядерных исследований и на сайте <http://www.info.jinr.ru/dissertation>

Автореферат разослан “\_\_\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2015 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

кандидат физико-математических наук, с.н.с.

В.А. Арефьев

## ***Актуальность работы***

В середине 80-х годов в ОИЯИ была разработана оригинальная конструкция структурных магнитов синхротрона, геометрия поля в которых формируется магнитным сердечником, а возбуждается поле сверхпроводящей (СП) обмоткой. Благодаря существенно меньшим, по сравнению с другими типами СП магнитов, индуктивности и запасенной энергии, такие магниты могут эксплуатироваться при темпе роста поля до 4 Тл/с. Первый быстроциклирующий СП синхротрон с магнитами такой конструкции - Нуклотрон - был сооружен в ОИЯИ и введен в эксплуатацию в 1993 г. Обеспечение надежной эксплуатации магнитной системы в ходе пуско-наладочных работ на Нуклотроне подразумевало создание системы детектирования перехода обмоток магнитов в нормально-проводящую фазу.

В 2000 г. был реализован медленный вывод пучка ионов, ускоренных в Нуклотроне. Это потребовало установки в кольце нескольких дополнительных СП магнитов и создания системы их защиты.

В 2007 г. была начата модернизация ускорительного комплекса Нуклотрон с целью подготовки его к работе в составе инжекционной цепочки тяжелоионного коллайдера ускорительного комплекса NICA (Nuclotron-based Ion Collider Facility), сооружаемого в ОИЯИ. Одной из задач модернизации являлось обновление системы защиты СП магнитов на основе современных технических решений.

В настоящее время ведутся работы по созданию двух СП быстроциклирующих синхротронов – бустерного синхротрона (Бустера) комплекса NICA и синхротрона SIS-100 (проект FAIR – Facility for Antiproton and Ion Research, Дармштадт, Германия). Разработка концепции построения систем детектирования перехода в нормально проводящую фазу для подобных ускорителей также являлось одной из задач данной работы.

## ***Основные цели работы***

Данная работа имела следующие цели:

- создание системы датчиков перехода для ввода в эксплуатацию СП синхротрона Нуклотрон,
- создание датчиков перехода для устройств системы медленного вывода пучка Нуклотрона,

- модернизация систем детектирования перехода в нормально проводящую фазу действующего синхротрона Нуклотрон, для обеспечения надежной работы ускорителя на максимальном проектном поле дипольных магнитов,

- разработка конструкции универсального датчика перехода для ускорительного комплекса NICA.

### ***На защиту выносятся:***

1. Конструкция датчиков перехода, структура и результаты эксплуатации системы детектирования переходов, созданной для проведения физического пуска Нуклотрона.
2. Конструкция датчиков перехода, созданных для ввода в эксплуатацию системы медленного вывода пучка Нуклотрона.
3. Технический проект модернизации системы датчиков перехода Нуклотрона и результаты ввода ее в эксплуатацию.
4. Концептуальный проект системы детектирования переходов на вновь создаваемых сверхпроводящих установках ускорительного комплекса NICA. Конструкция и результаты испытания универсального датчика перехода.

### ***Научная новизна***

Разработана, создана и успешно эксплуатировалась в течение 20 лет система детектирования перехода в нормально проводящую фазу магнитов первого в мире сверхпроводящего быстроциклирующего синхротрона Нуклотрон.

Разработан проект системы детектирования перехода в нормально проводящую фазу для вновь создаваемых сверхпроводящих установок ускорительно-коллайдерного комплекса NICA.

### ***Личный вклад автора***

Личное участие автора в получении результатов, составляющих основу диссертации, является определяющим. Им лично принималось участие в разработке конструкции датчиков перехода для СП магнитов Нуклотрона и систем медленного вывода, им лично разрабатывался технический проект модернизации системы датчиков перехода Нуклотрона, им лично разрабатывался концептуальный проект системы детектирования переходов на вновь создаваемых сверхпроводящих установках ускорительного комплекса NICA и конструкция универсального датчика перехода.

## ***Практическая ценность работы***

Создание и развитие системы детектирования перехода обмоток СП магнитов в нормально-проводящую фазу обеспечило надежную эксплуатацию Нуклотрона для реализации программы физических исследований на внутренней мишени и на выведенных пучках. Модернизация системы обеспечила возможность надежной эксплуатации Нуклотрона на максимальном проектном поле дипольных магнитов. Разработанная конструкция универсального датчика перехода в нормально-проводящую фазу положена в основу системы защиты Бустера проекта NICA. Аналогичные датчики планируется использовать на стенде по тестированию СП магнитов, для устройств канала транспортировки пучка из Бустера в Нуклотрон, для элементов колец коллайдера NICA.

## ***Апробация работы***

Основные результаты диссертации докладывались на российских и международных ускорительных конференциях PAC 2001 (Чикаго, США), RuPAC 2012 (СПб), IPAC 2013 (Шанхай, Китай), международном совещании «Релятивистская ядерная физика: от сотен МэВ до ТэВ» (Болгария, Варна, 2001 г.), неоднократно обсуждались на научных семинарах в Объединенном Институте Ядерных Исследований.

## ***Публикации***

Основные результаты диссертации опубликованы в 13 работах, из них две статьи в журналах, входящих в список рекомендованных ВАК.

## ***Структура и объем диссертации***

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы из 38 наименований. Общий объем: 74 страницы, содержит рисунков - 32.

## ***Содержание диссертационной работы***

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, дан краткий анализ проблем, решаемых в диссертации, и сформулированы цели исследований, вошедших в работу.

Основное содержание работы изложено в 5 главах.

**В первой главе** приведен обзор методов детектирования переходов, сформулированы основные требования к датчикам перехода, структуре и функциям системы детектирования.

На основе имевшегося мирового опыта и с учетом особенностей конструкции магнитов Нуклотрона за основу построения системы эвакуации энергии было принято техническое решение, основанное на установке балластного резистора снаружи криостата совместно с коммутирующим устройством, замыкающим цепь группы магнитов на этот резистор в случае срыва сверхпроводимости. За основу системы детектирования перехода был принят датчик перехода (ДП) работающий по мостовой схеме. Критерием наличия перехода является одновременное превышение порога по амплитуде напряжения разбаланса моста  $V_{th}$  и по длительности -  $T_v$  (validation time). Плечами моста, где это возможно, являются обмотки соседних идентичных магнитов. Для повышения надежности работы системы было решено использовать дублирование.

По результатам испытаний, проведенных на одиночном магните и при испытаниях октанта магнитной системы, была определена структура системы эвакуации и сформулированы основные требования к ДП. Конструкция ДП должна обеспечивать, гальваническую изоляцию датчиков как от общих земляных цепей, так и друг от друга. При этом система детектирования не должна вносить паразитные утечки в электрические цепи ускорителя. При токе эвакуации энергии 6 кА, потенциалы различных участков цепи магнитов относительно «земли» могут достигать  $\pm 500$  В. Изоляция ДП должна надежно выдерживать удвоенное значение, что необходимо при нештатной работе одного из ключей эвакуации энергии. Порог срабатывания датчика, контролирующего соседние магниты, составляет  $V_{th} \geq 60$  мВ, время превышения порога  $T_v$ , являющееся признаком перехода, варьируется в интервале 1 - 5 мс. Для групповых датчиков пороговое напряжение составляет 100 мВ.

Система управления ДП должна обеспечивать следующий минимальный набор функций: индикация перехода и формирование сигнала активации системы эвакуации энергии, оперативный контроль состояния всех датчиков и формирование сигнала на запрет цикла в случае обнаружения неисправности.

Во второй главе описаны основные схмотехнические и конструктивные решения, принятые при создании системы детектирования переходов для Нуклотрона на период пуско-наладочных работ.

К моменту проведения пуско-наладочных работ на Нуклотроне была разработана конструкция ДП, полностью удовлетворяющая требованиям надежности, изготовлено и протестировано более 200 датчиков. В отличие от имевшихся аналогов, в датчике, разработанном для Нуклотрона (Рис. 1), амплитудный компаратор размещен на изолированной от потенциала земли части схемы, временной компаратор – на заземленной, а гальваническая развязка выполнена на основе цифровой оптопары. Кроме того на изолированной части располагаются источник питания, усилитель, вход которого защищен ограничителем амплитуды, препятствующим также и уширению коротких импульсов большой амплитуды после интегрирования. Сигнал с амплитудного компаратора является дискретным и несет информацию о превышении амплитудного порога срабатывания датчика и длительности этого превышения. На заземленной части схемы ДП измеряется длительность этого сигнала и при превышении порога (1-5 мс) формируется выходной сигнал. Выбор уставок амплитудного и временного компараторов позволяет отстроиться от ложных срабатываний и надежно фиксировать момент перехода в нормально-проводящую фазу.

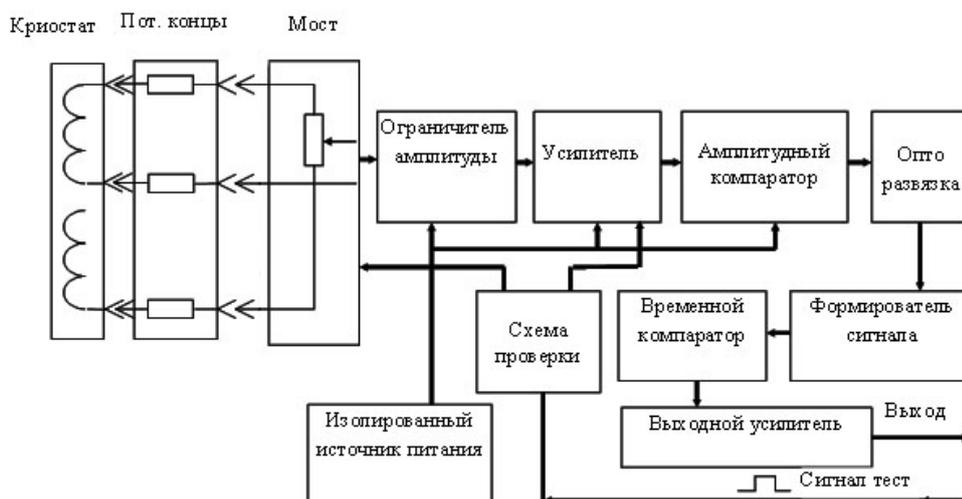


Рис. 1. Блок схема первой реализации датчика перехода.

Для проверки работоспособности ДП перед подачей цикла магнитного поля, в измерительную цепь моста был включен трансформатор, на котором во время проверки генерируется один период синусоиды тестового напряжения (рис. 2). Этот сигнал, проходя через линии связи и элементы измерительного моста, поступает на вход датчика перехода, который и контролирует его наличие. В случае отсутствия сигнала на выходе датчик формирует сигнал на запрет цикла.

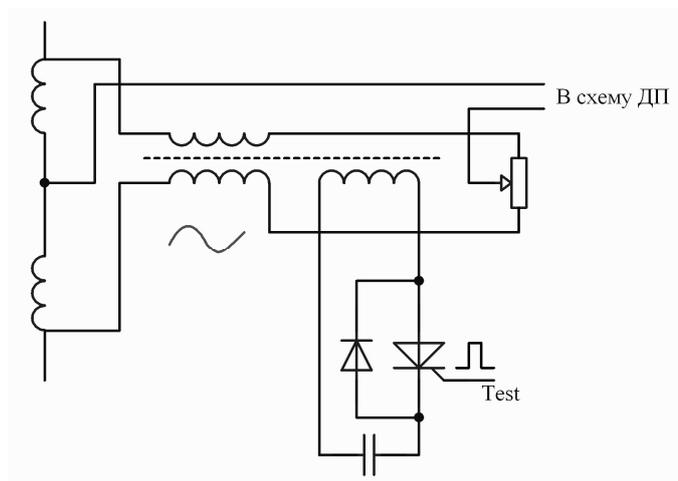


Рис. 2. Схема проверки датчика перехода.

На основе ДП была разработана структура системы детектирования, и создана система управления, обеспечивающая выполнение минимально-необходимого набора функций. Созданная и введенная в эксплуатацию система обеспечила надежную безаварийную работу ускорителя в течение почти 20 лет.

**В третьей главе** описана конструкция датчиков перехода, созданных для защиты СП элементов системы медленного вывода пучка.

В 2001 году на Нуклотроне была введена в эксплуатацию система медленного вывода пучка. Для ее реализации в кольце Нуклотрона были установлены дополнительные сверхпроводящие устройства: два магнита Ламбертсона, 4 квадрупольных и 4 секступольных магнита. Кроме того была изменена схема питания 4-х дипольных магнитов, расположенных в окрестности медленного вывода. Для защиты новых СП устройств структура системы детектирования переходов была доработана, разработана и испытана новая конструкция ДП, основанная на той же структурной схеме (рис 1), но выполненная с применением более современной элементной базы (Рис. 3).



Рис . 3. Датчик перехода для устройств медленного вывода.

Созданная и введенная в эксплуатацию система обеспечила надежную безаварийную работу устройств системы медленного вывода.

**В четвертой главе** описывается проект модернизации системы детектирования переходов, этапы ее разработки и результаты ввода в эксплуатацию.

В ходе модернизации ускорительного комплекса Нуклотрон была разработана, испытана и введена в эксплуатацию новая система детектирования переходов, основанная на современных технических и конструктивных решениях (Рис. 4). Использование микроконтроллерного управления позволило все датчики объединить по управлению и передаче информации на основе последовательных интерфейсов. При этом возможно удаленно оперативно менять количество действующих датчиков, управлять режимом их работы, устанавливать индивидуальные пороги срабатывания, записывать в память датчика контролируемый сигнал для дальнейшей визуализации и анализа. В систему также введен контроль текущего состояния всех узлов, контроль сигналов воздействия на внешние устройства и индикация неисправностей. На изолированной части ДП расположены: мостовой балансирующий резистор  $R_{bal}$ , ограничитель уровня входного сигнала, предварительный масштабирующий усилитель с функцией интегрирования и аналоговый изолирующий усилитель. На заземленной части: аналоговый изолирующий усилитель, амплитудный компаратор, аналоговый ключ, микропроцессор, драйверы шин, изолированный DC/DC преобразователь и источники питания собственных нужд.

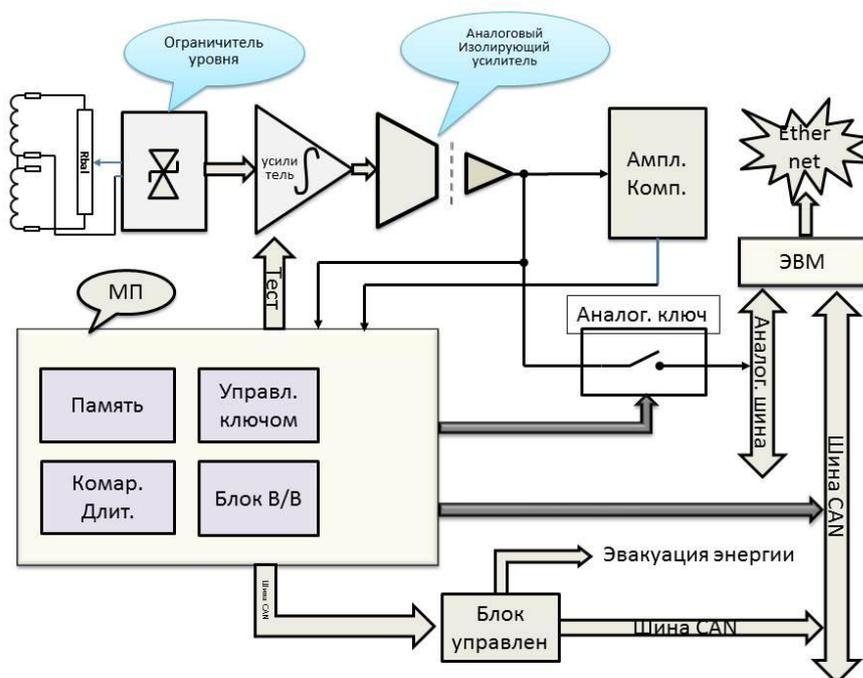


Рис. 4. Блок-схема датчика перехода.

Сигнал с мостовой схемы усиливается усилителем - интегратором. Интегрирование уменьшает действие коротких импульсов помех. Для уменьшения расширения коротких импульсов большой амплитуды интегратором на входе усилителя применен ограничитель амплитуды, который также защищает вход усилителя от перегрузок. Далее усиленный сигнал передается на заземлённую часть ДП через аналоговый изолирующий усилитель. Полученный сигнал разбаланса подается на вход амплитудного компаратора и на вход АЦП микроконтроллера. Этот же сигнал через аналоговый ключ может быть подключен к аналоговой шине для передачи на удаленный АЦП для визуального наблюдения. Сигнал разбаланса анализируется микроконтроллером и, в случае превышения его амплитуды и времени действия заданных пороговых величин, вырабатывается сигнал на включение системы эвакуации энергии. АЦП микроконтроллера записывает оцифрованный сигнал во внутреннюю память для дальнейшего его анализа и визуализации при необходимости. Микроконтроллер связывает ДП с внешними блоками и ЭВМ по шине CAN, по которой обменивается информацией и управляющими сигналами.

Схема проверки датчика также была усовершенствована: вместо громоздкого трансформатора использована схема смещения средней точки (рис. 5). Средняя тока моста подключена к виртуальному нулю операционного усилителя, который в момент проверки смещается в плюс или минус. Протекающий ток контролируется ДП. При отсутствии тока генерируется сигнал запрета цикла.

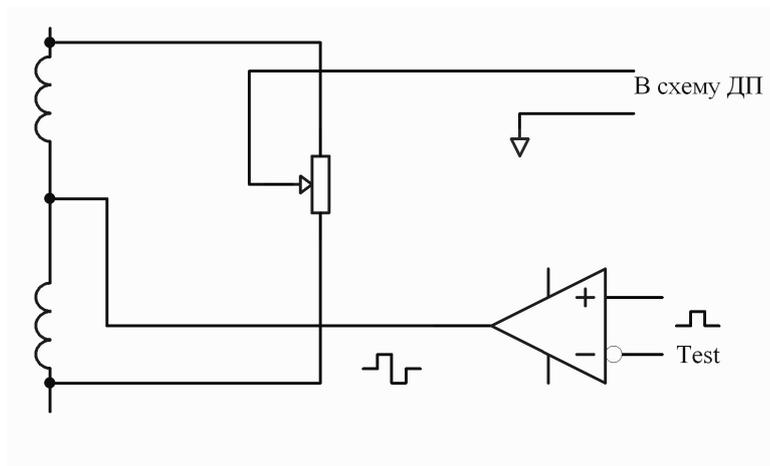


Рис. 5. Схема проверки датчика со смещением средней точки.

В июне 2009 г. были проведены испытания макета ДП, целью которых являлась проверка правильности концепции обработки сигнала и отсутствия принципиальных ошибок в схемотехническом построении датчика. В ходе 41-го сеанса Нуклотрона (февраль – март 2010 года) был испытан прототип датчика и продемонстрирована его устойчивая и надежная работа. К началу 44-го сеанса (декабрь 2011 года) был

изготовлен и установлен на Нуклотроне опытный фрагмент новой системы детектирования перехода, включающий в себя 20 ДП. В ходе 44-го и 45-го (февраль-март 2012 года) сеансов новые датчики суммарно отработали с циклом магнитного поля более 1500 часов. Была продемонстрирована стабильная и надежная работа всех элементов новой системы. Полномасштабное внедрение новой системы было осуществлено в ходе 46-го сеанса Нуклотрона (ноябрь-декабрь 2012 года), а опытный вариант системы управления введен в эксплуатацию в 47-м сеансе (февраль – март 2013).

Ввод в эксплуатацию новой системы детектирования переходов позволил обеспечить безопасную и стабильную работу магнитной системы Нуклотрона при проектной величине поля и в режиме с длинными «столами» магнитного поля. В качестве наиболее важных результатов можно отметить ускорение пучка до проектной энергии Нуклотрона, впервые осуществленное в декабре 2013 года, и реализацию в марте 2013 года стохастического охлаждения пучка дейтронов, циркулирующего на «столе» поля длительностью до 10 минут.

**В пятой главе** приведен концептуальный проект системы детектирования переходов вновь создаваемых ускорительных установок комплекса NICA.

В рамках создания в ЛФВЭ ОИЯИ ускорительно-коллайдерного комплекса NICA проектируется несколько новых СП установок: Бустерный синхротрон, два кольца коллайдера для столкновения пучков тяжелых ионов и поляризованных пучков легких ионов, канал транспортировки пучка из Бустера в Нуклотрон и др. Разработанная концепция построения системы детектирования переходов на вновь создаваемых СП установках комплекса NICA основана на применении универсального ДП. Имея на борту два независимых канала измерения сигнала он может применяться как для контроля сигнала с мостовой схемы так и для непосредственного измерения сигналов на индуктивных элементах и их сравнения (либо сравнения сигнала с контролируемого индуктивного элемента и опорного сигнала производной поля).

Схема ДП (Рис. 6) состоит из двух изолированных каналов, каждый из которых может получать аналоговый сигнал с максимальной амплитудой  $\pm 10$  Вольт. Чувствительность канала регулируется в широких пределах входными усилителями, поэтому источником сигнала для схемы может быть как сигнал с моста ( $\sim 100$  мВ) так и с индуктивного элемента ( $\sim 5$  В). Далее входные сигналы оцифровываются и через оптический изолятор передаются на процессорный модуль, который их и анализирует. Анализ может проводиться по амплитудным и временным характеристикам сигнала, а также путем сравнения сигналов между собой для выделения резистивной составляющей.

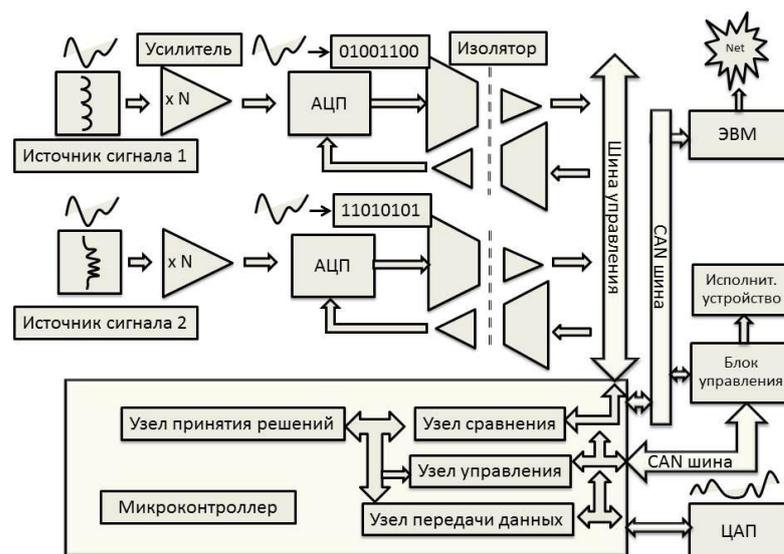


Рис. 6. Блок схема универсального датчика перехода.

Проверка работоспособности системы осуществляется без подачи импульсных сигналов и может производиться в любое время цикла. Для дополнительного подавления помех используется цифровая фильтрация входного сигнала.

Правильность концепции обработки сигнала и отсутствие принципиальных ошибок в схемотехническом построении были проверены на макете датчика, протестированном в ходе сеанса Нуклотрона. Начало серийного изготовления датчиков намечено на 2014 год.

**В заключении** представлены основные результаты работы.

## Выводы

1. В ходе выполнения данной работы была разработана концепция построения и создана система детектирования переходов, обеспечившая надежную работу первого в мире быстроциклирующего СП синхротрона Нуклотрон при проведении на нем пуско-наладочных работ и, впоследствии, в течение 15 лет эксплуатации. Датчик перехода основан на использовании мостовой схемы. В отличие от имевшихся аналогов, в разработанном датчике амплитудный компаратор размещен на изолированной части схемы, временной компаратор – на заземленной, а гальваническая развязка выполнена на основе цифровой оптопары.
2. Для защиты СП устройств системы медленного вывода пучка из Нуклотрона структура системы детектирования переходов была доработана, разработана и испытана новая конструкция датчика перехода, основанная на той же структурной схеме, но выполненная с применением более современной элементной базы.

Созданная и введенная в эксплуатацию система обеспечила надежную безаварийную работу устройств системы медленного вывода.

3. В ходе модернизации ускорительного комплекса была создана и введена в эксплуатацию новая система детектирования переходов, основанная на современных схемотехнических решениях и включающая в себя многофункциональную систему автоматического управления. Ее использование позволило провести успешный эксперимент по стохастическому охлаждению пучка дейтронов, и осуществить ускорение пучка до максимальной проектной энергии.
4. Разработана концепция построения системы детектирования переходов на вновь создаваемых СП установках комплекса NICA, основанная на применении универсального датчика перехода. Для реализации всех необходимых функций на борту датчика размещены два изолированных канала, оцифрованные сигналы с которых передаются на процессорный модуль через оптический изолятор. Проверка работоспособности системы осуществляется без подачи импульсных сигналов и может производиться в любое время цикла. Для подавления помех используется цифровая фильтрация входного сигнала. Макет датчика успешно протестирован в сеансе работы Нуклотрона. Разработанная концепция построения системы детектирования удовлетворяет всем требованиям проекта NICA.

**Основные результаты диссертации опубликованы в рецензируемых журналах (п. 10, 13), трудах конференций (пп. 1, 2, 7, 8, 11), сообщениях ОИЯИ (3, 4, 5, 6, 9, 12):**

1. E.V.Ivanov, The Detection's System of Quench of Superconducting Lens of Slow Extraction of Nuclotron, Труды международного совещания «Релятивистская ядерная физика: от сотен МэВ до ТэВ», Болгария, Варна, 10-16 сентября 2001 г., Дубна 2001, стр. 215-225.
2. N.N.Agapov, V.A.Andreev,..., E.V.Ivanov, at. al., Slow beam extraction from the Nuclotron, Proceedings of the 2001 Particle Accelerator Conference, Chicago, pp. 1646-1648
3. Агапов Н.Н., Алфеев А.В., ... Иванов Е.В., и др., Ход реализации проекта «Нуклотрон-М» (по итогам сенсов № 37, 38), Сообщения ОИЯИ, Р9-2009-38, Дубна 2009
4. Аверичев А.С., Агапов Н.Н., ... Иванов Е.В., и др., «Итоги 39-го сеанса Нуклотрона», Сообщения ОИЯИ, Р9-2009-131, Дубна 2009
5. Аверичев А.С., Агапов Н.Н., ... Иванов Е.В., и др., «Итоги 40-го и 41-го сеансов Нуклотрона», Сообщения ОИЯИ, Р9-2010-68, Дубна 2010

6. Аверичев А.С., Агапов Н.Н., ... Иванов Е.В., и др., Итоги 42-го и 43-го сеансов Нуклотрона, Сообщения ОИЯИ, Р9-2011-72, Дубна 2011
7. E.Ivanov, A.Sidorin, G.Trubnikov, «The quench detection system for superconducting elements of Nuclotron acceleration complex», proceedings of RuPAC2012, Saint-Petersburg, pp. 605-607,  
<http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/rupac2012/papers/weppd024.pdf>
8. A. Sidorin, N. Agarov, ..., E. Ivanov, et al., Status of the Nuclotron, proceedings of RuPAC2012, Saint-Petersburg, pp. 117-119,  
<http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/rupac2012/papers/wezch03.pdf>
9. Аверичев А.С., Агапов Н.Н., ... Иванов Е.В., и др., «Итоги 44-го и 45-го сеансов Нуклотрона», Сообщения ОИЯИ, Р9-2012-108, Дубна 2012
10. Е.В.Иванов, Г.В.Трубников, А.О.Сидорин, З.И.Смирнова, Система детектирования перехода в нормально-проводящую фазу сверхпроводящих магнитов ускорительного комплекса Нуклотрон, Письма в ЭЧАЯ, 2013, Т 10, №4(181), с. 603-612.
11. G.Trubnikov, N.Agarov, ..., E. Ivanov, et al., NICA project at JINR, Proceedings of IPAC2013, Shanghai, China, pp. 1343-1345,  
<http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/IPAC2013/papers/tupfi009.pdf>
12. Аверичев А.С., Агапов Н.Н., ... Иванов Е.В., и др., «Итоги 46-го и 47-го сеансов Нуклотрона», Сообщения ОИЯИ, Р9-2013-140, Дубна 2013
13. Е.В.Иванов, Л.А.Светов, З.И.Смирнова, Датчик перехода в нормально-проводящую фазу сверхпроводящих элементов ускорительного комплекса NICA, Письма в ЭЧАЯ, 2014, Т.11, №4(188).с. 753-759