

Отзыв официального оппонента
на диссертацию **Иванова Евгения Владимировича**
«Система детектирования перехода в нормально-проводящую фазу
сверхпроводящих магнитов ускорительного комплекса НУКЛОТРОН»
представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности
01.04.20 – физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.

Цель представленной работы состояла в проведении экспериментальных исследований и технических разработок, направленных на создание надежной системы защиты сверхпроводящих магнитов ускорительного комплекса Нуклотрон, обеспечивающей эвакуацию накопленной в них энергии при переходе сверхпроводника в нормально-проводящую фазу.

Актуальность темы диссертации определяется технологической значимостью решаемой задачи, связанной с повышенным риском выхода из строя уникального дорогостоящего оборудования сверхпроводящих магнитов при неизбежно возникающих время от времени в процессе долговременной эксплуатации ускорительной установки сбоях в работе систем энергоснабжения, охлаждения, управления и др. Создание системы детектирования перехода сверхпроводящих магнитов в нормально-проводящую фазу, обеспечивающей их защиту от фатальных перегрузок, на каждом сверхпроводящем ускорителе безусловно является актуальной научно-технической задачей и всегда основывается на комплексных исследованиях конструктивных особенностей конкретных сверхпроводящих элементов в структуре создаваемой установки и выборе оптимальных схмотехнических подходов, учитывающих специфику реализуемых технологических условий. При создании первого в мире сверхпроводящего ускорителя Нуклотрон была разработана оригинальная конструкция структурных магнитов, в которых магнитное поле формируется сверхпроводящей обмоткой и железным сердечником, рассчитанных на беспрецедентно высокую скорость нарастания индукции магнитного поля, создаваемого сверхпроводящей обмоткой, до 4 Тл/с. Столь высокая скорость подъема поля в сверхпроводящем магните безусловно относится к экстремальным условиям эксплуатации сверхпроводящего ускорителя и существенно усложняет решение задачи прецизионного детектирования перехода сверхпроводника в нормально-проводящую фазу.

Практическая значимость выполненной автором работы подтверждается решением следующих задач:

1) Разработана и реализована конструкция датчика детектирования перехода в нормально-проводящую фазу сверхпроводящих обмоток

магнитных элементов ускорителя Нуклотрон в криостатной системе магнитного кольца, учитывающая специфику данного ускорителя и реализующая минимально необходимый набор функций для обеспечения надежного контроля состояния магнитов и эвакуацию запасенной энергии магнитного поля в аварийных ситуациях при гарантированно низком количестве ложных срабатываний.

2) На основе проведенных исследований и технологических испытаний разработана и реализована система детектирования локального перехода в нормально-проводящую фазу сверхпроводящих обмоток магнитных элементов и эвакуации энергии из кольцевой магнитной структуры ускорителя Нуклотрон, работающая с высоким коэффициентом надежности и обеспечившая многолетнюю безаварийную эксплуатацию ускорителя.

3) Успешно проведена модернизация действующей системы детектирования локального перехода в нормально-проводящую фазу сверхпроводящих обмоток магнитных элементов комплекса Нуклотрон с переводом использовавшейся ранее и морально устаревшей электроники на современную элементную базу, позволившую продлить на неопределенное время срок надежную эксплуатацию сверхпроводящего ускорителя и существенно расширить вспомогательные функции модернизированной системы по контролю состояния ее элементов и отображению и документированию оперативной информации.

Научная новизна положений, представленных в диссертационной работе, состоит в следующем: впервые разработано и реализовано схемотехническое решение проблемы детектирования локального перехода в нормально-проводящую фазу сверхпроводящих обмоток магнитных элементов, работающих с рекордно высокой скоростью нарастания магнитного поля 4 Тл/с.

Достаточно высокая степень обоснованности научных положений выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, подтверждается проверкой в реальных условиях многолетней безаварийной эксплуатации ускорительной установки всех схемотехнических подходов, предложенных автором в процессе выполнения научной работы и реализованных на практике, и решением, в конечном итоге, специфической и крайне важной для сверхпроводящего ускорителя проблемы эвакуации накопленной в магнитах энергии в нештатных ситуациях.

Содержание диссертации, состоящей из введения, пяти глав и заключения, соответствует теме диссертации и достаточно кратко дает полное представление об объеме и качестве проделанной автором работы и полученных результатах.

Во **Введении** автор сформулировал все основные характеристики выполненной диссертационной работы: актуальность темы, основные цели

работы, выносимые на защиту положения, научную новизну, практическую ценность работы, результаты ее апробации.

В Главе 1, посвященной описанию «требований к датчикам перехода, структуре и функциям системы детектирования», дается представление о физике рассматриваемых при решении задачи детектирования перехода сверхпроводника в нормально-проводящую фазу процессов, приведен обзор методов детектирования таких переходов на существующих сверхпроводящих ускорителях и детализированы требования к результатам решаемых в диссертации задач, а также концептуально схемотехнические решения проблемы аварийной эвакуации энергии для магнитного кольца Нуклотрона.

Глава 2 посвящена описанию основных элементов схемотехнических и конструктивных решений, принятых при создании системы детектирования переходов сверхпроводника в нормально-проводящую фазу для ускорительного комплекса Нуклотрон предположительно на период пуско-наладочных работ на этом ускорителе. В качестве контролируемых элементов выбраны пары соседних сверхпроводящих магнитов, подключаемых по мостовой схеме к оригинальной конструкции датчика, реализующего через элементы гальванической развязки функции проверки состояния контролируемых цепей и прецизионного контроля амплитуды и длительности сигнала разбаланса мостовой схемы, указывающего с достаточной достоверностью на переход сверхпроводника в одном из магнитов в нормально-проводящую фазу. Для повышения надежности в систему контроля введены т.н. групповые датчики, контролирующие 16 групп магнитов и 8 групп квадрупольных линз. Созданная на период пуска Нуклотрона система, как сообщается в диссертации, обеспечила безаварийную эксплуатацию ускорителя в течение около 20 лет.

Глава 3 посвящена описанию расширения контролируемых функций созданной системы детектирования состояния сверхпроводящих элементов комплекса Нуклотрон на дополнительные сверхпроводящие элементы системы медленного вывода. Специфика решаемой задачи состояла в особенностях реализованной системы медленного вывода, в которой сверхпроводящий магнит Ламбертсона включен последовательно с основными магнитами ускорителя, при этом четыре основных магнита ускорителя были исключены из общей цепи питания основных магнитов и запитаны от отдельных функционально управляемых источников питания для создания локального искажения орбиты, обводящего нож электростатического септума на начальном этапе ускорения пучка. Для каждого из перечисленных сверхпроводящих элементов системы медленного вывода была собрана отдельная мостовая схема, настроенная с учетом детально исследованной динамики вырабатываемого сигнала в процессе ускорения и медленного вывода пучка.

Глава 4 посвящена достаточно полному изложению результатов выполненной в период 2007-2012 гг. модернизации системы детектирования переходов сверхпроводника в нормально-проводящую фазу в ускорительном комплексе Нуклотрон, с целью подготовки его к работе в составе создаваемого в ОИЯИ тяжелоионного коллайдера NICA. Использование современной элементной базы и сетевого микропроцессорного управления позволили при сохранении основной идеологии построения системы существенно расширить ее функциональные возможности по сбору, накоплению, систематизации и отображению информации о динамическом состоянии всех элементах данной системы в составе всего ускорительного комплекса. Модернизированная система, введенная в полном объеме в эксплуатацию, прошла успешное испытание в процессе вывода ускорителя Нуклотрон на максимальный уровень энергии ускоренного пучка, соответствующий увеличенному до максимального значения току в сверхпроводящих обмотках магнитов и, соответственно, - предельно высокому риску потери сверхпроводимости в токовых цепях при наличии разного рода неидеальностей, которых трудно избежать. Кардинально новое качество модернизированной системы позволило, в частности, достаточно оперативно выявить ряд слабых мест в сильнооточных цепях ускорителя и устранить все основные причины, препятствующие его надежной эксплуатации при максимальной энергии ускоренного пучка.

В главе 5 представлен обобщающий накопленный диссертантом опыт построения систем защиты сверхпроводящих магнитов материал, использованный в качестве основы концептуального проекта системы детектирования переходов сверхпроводника в нормально-проводящую фазу во вновь создаваемых ускорительных установках тяжелоионного комплекса NICA. Предложенная концепция рассчитана на контроль состояния сверхпроводящих элементов, работающих в режимах постоянного, квазипостоянного и быстро изменяющегося тока в условиях достаточно высокого уровня нестационарных помех, создаваемых разными системами ускорительного комплекса. Реализация всех необходимых функций контроля состояния сверхпроводимости достигается на основе использования специально разработанного т.н. «универсального датчика перехода», составленного из двух независимых каналов измерения технологических сигналов, процессорный анализ которых позволяет с высокой степенью надежности идентифицировать признаки локального перехода сверхпроводника в нормально-проводящую фазу.

В заключении в тезисной форме в четырех кратких абзацах приведены основные практические результаты диссертационной работы, заключающиеся во внедрении выполненных автором диссертации научных исследований и разработок в действующую и эффективно развиваемую электрофизическую установку.

Замеченные недостатки по содержанию диссертации состоят в следующем следующие:

1) В кратком обзоре существующих сверхпроводящих ускорителей и их систем детектирования перехода сверхпроводника в нормально-проводящую фазу наряду с созданными и работавшими длительное время ускорителями (TEVATRON, HERA, RHIC) рассматриваются спроектированные ускорители (ISABELLE, CBA, УНК), которые не были построены и, соответственно, их технические решения не была проверены на практике. Кроме того, в обзоре делается необоснованное утверждение, что протонный синхротрон на энергию 820 ГэВ комплекса HERA является «ближайшим аналогом Нуклотрона» (стр.9).

2) В достаточно краткое содержание диссертации не вошли результаты выполненных автором многочисленных исследований динамических процессов, положенных в основу схмотехнических решений разработанной аппаратуры и связанных с переходом сверхпроводника в нормально-проводящую фазу и анализом генерируемых этими процессами сигналов в реальных условиях действующей ускорительной установки, а также настройкой характеристик элементов системы, влияющих на качество ее работы.

3) В диссертации отсутствует характеризующая качество созданной системы статистическая информация о количестве аварийных переходов в процессе эксплуатации ускорителя, вызванных внешними причинами и ложным срабатыванием аппаратуры.

4) В схеме модернизированного датчика (стр.27), в которой сигнал разбалансировки обрабатывается и анализируется микроконтроллером, не совсем понятно назначение компаратора, через который также пропускается этот сигнал.

5) На рис.4.4 приведены осциллограммы «сигналов датчика перехода при мощности нагревателя 17 Вт ... и 3 Вт», существенно отличающиеся по форме, а не только по длительности наблюдаемых процессов, как это отмечено в диссертации.

6) Описанный на стр.30-31 эффект т.н. «динамического разбаланса», обнаруженный на нескольких магнитных элементах и объясненный «паразитной емкостью между средней точкой мостовой схемы и землей в цепях вывода сигнала из криостата» требует дополнительного изучения, т.к. возможно указывает на особенность конструкции конкретного магнита, которая может приводить к искажению магнитного поля и влиять на динамику ускоряемого пучка. Устранение данного эффекта предложенным в диссертации уменьшением защитных сопротивлений (стр.32) представляется неполным решением данной проблемы.

7) При разработке концепции системы детектирования переходов для комплекса NICA учитывался, в частности, опыт создания аналогичной системы для коллайдера LHC в ЦЕРН (стр.39), однако в диссертации

отсутствует упоминание о серьезной аварии на этом ускорителе, связанной с системой эвакуации энергии магнитного поля, в результате которой было выведено из строя достаточно много сверхпроводящих магнитов.


Отмеченные критические замечания не снижают положительной оценки диссертационной работы, в результате выполнения которой создана система детектирования перехода в нормально-проводящую фазу сверхпроводящих магнитов ускорительного комплекса Нуклотрон, обеспечившая его многолетнюю безаварийную эксплуатацию.

Результаты диссертационной работы известны специалистам по докладам на семинарах и конференциях и публикациям в реферируемых журналах и трудах конференций и могут быть использованы в научных центрах ИФВЭ, ИТЭФ, ФИАН, ИЯФ, GSI, CERN.

Диссертационная работа Е.В.Иванова представляет собой законченную исследовательскую работу и удовлетворяет всем требованиям ВАК России, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, а сам Иванов Евгений Владимирович заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.20 – физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника за решение технической задачи, имеющей большое значение для развития технологии создания быстроциклирующих сверхпроводящих ускорителей.

Автореферат диссертации правильно отражает ее содержание.

Доктор физико-математических наук
адрес: 117218, Россия, Москва, ул. Б. Черемушкинская 25,
Тел. 499-127-47-44, факс: 499-127-08-21,
e-mail: nalex@itep.ru


Н. Н. Алексеев

30 июля 2015 года

Подпись Н.Н.Алексеева заверяю;

Ученый секретарь ФГУП ГНЦ РФ ИТЭФ
кандидат физико-математических наук



В.В.Васильев