

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

Е. В. Иванов, Г. В. Трубников, А. О. Сидорин, З. И. Смирнова

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Новая система детектирования перехода в нормально проводящую фазу обмоток сверхпроводящих магнитов для синхротрона нуклотрон была создана в период с 2007 по 2012 г. в ходе подготовки ускорителя для его работы в составе инжекционной цепочки тяжелоионного коллайдера NICA и как источника релятивистских тяжелых ионов для эксперимента BM@N (Baryonic Matter at Nuclotron). Приводятся результаты тестирования ее элементов и опытной эксплуатации в ходе сеансов работы ускорителя.

A new quench detection system for the superconducting synchrotron Nuclotron was created in 2007–2012 during preparation of the accelerator for its work as a part of the NICA heavy-ion collider injection chain and as a source of relativistic heavy ions for BM@N (Baryonic Matter at Nuclotron) experiment. The results of tests of its elements and experimental operation are presented.

PACS: 29.20.-c; 29.20.db; 29.20.+g

ВВЕДЕНИЕ

Магнитно-криостатная система ускорительного комплекса ЛФВЭ состоит из кольца нуклотрона и измерительного суперпериода [1]. Измерительный суперпериод включает в себя четыре дипольных и четыре квадрупольных (два фокусирующих и два дефокусирующих) магнита. В кольце нуклотрона размещены 96 структурных дипольных магнитов, 64 структурных квадрупольных магнита, два магнита Ламбертсона и четыре квадрупольных магнита системы медленного вывода пучка, инфлекторный магнит системы инжекции, несколько десятков дипольных, секступольных и октупольных корректирующих магнитов. Корректирующие магниты питаются индивидуально от источников малой мощности, конструкция которых обеспечивает их защиту в случае перехода обмотки в нормально проводящую фазу. Защита всех остальных магнитов основана на системе эвакуации энергии, включающей в себя мощные тиристорные ключи и резисторы гашения поля. При обнаружении перехода обмотки одного из магнитов в нормально проводящее состояние питание магнитов отключается, а тиристорные ключи вводят в цепь резисторы гашения поля, в которых диссипирует накопленная в магнитах энергия. Аналогичная «идеология» построения системы питания и защиты сверхпроводящих магнитов была

принята и на сооружавшемся одновременно с нуклотроном синхротроне HERA (Гамбург, Германия) [2]. Однако существенной особенностью магнитов нуклотрона является малая величина индуктивности обмотки, что позволяет осуществить эвакуацию энергии с характерным временем 160 мс (характерное время эвакуации энергии на других сверхпроводящих синхротронах составляет от единиц до сотни секунд [3, 4]). Благодаря этому шунтирование магнитов холодными диодами не требуется.

Основным элементом системы детектирования является датчик перехода, предназначенный для сравнения аналоговых сигналов с двух сверхпроводящих индуктивных элементов ускорителя для выявления изменения сигнала одного из них, вызванного появлением активной составляющей сопротивления в этом элементе (потерей сверхпроводимости). Датчик перехода в нормально проводящую фазу, используемый на нуклотроне, основан на мостовой схеме. Достоинство этого метода заключается в том, что мост является пассивным элементом и может сравнивать сигналы в большом динамическом диапазоне практически от 0 В до максимального напряжения на магнитных элементах. Из недостатков следует отметить то, что мост может быть сбалансирован точно только на одной частоте (в реальной работе на постоянном токе) и, следовательно, может иметь паразитный разбаланс на частотах помех и при резких изменениях напряжения источника питания.

Для основной части магнитов, соединенных последовательно и питаемых от одного мощного источника, плечами моста являются обмотки двух соседних идентичных магнитов (дипольных, квадрупольных или Ламбертсона) и резистор, располагаемый снаружи криостата, которым и осуществляется балансировка моста (рис. 1). При возникновении нормально проводящей фазы в обмотке одного из магнитов в диагонали моста возникает разностное напряжение разбаланса, которое и фиксируется датчиком.

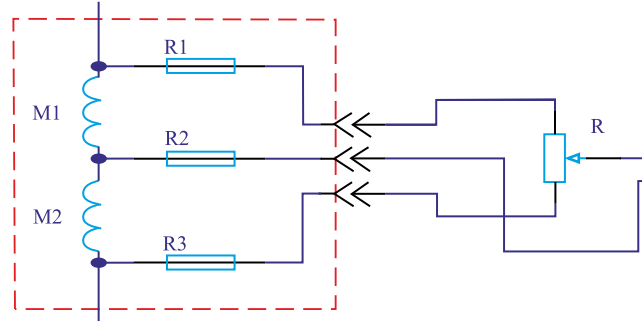


Рис. 1. Мостовая схема сравнения напряжений: M1 и M2 — обмотки соседних идентичных магнитов; R1–R3 — защитные резисторы; R — балансирующий резистор. Штриховой линией обведены элементы, расположенные внутри криостата

Токи четырех структурных дипольных магнитов, используемых для введения бампа орбиты в окрестности устройств медленного вывода пучка, настраиваются индивидуально с помощью дополнительных источников питания. Квадрупольные магниты системы медленного вывода также питаются индивидуально. Для этих магнитов и для инфлекторного магнита системы инъекции плечами измерительного моста являются половины обмоток, для чего используется потенциальный вывод со средней точки обмотки.

Первоначально система детектирования перехода в нормально проводящую фазу создавалась для нуклотрона в конце 1980-х гг. Это был полнофункциональный прототип, предназначенный для проведения пусконаладочных работ, который затем, после нескольких модификаций, эксплуатировался в течение почти 15 лет.

В разработке системы детектирования основным требованием было обеспечение надежности работы датчика перехода. Несрабатывание или отказ датчика могли привести к физическому повреждению контролируемых элементов. К таким же последствиям мог привести обрыв провода от средней точки моста.

Повышение надежности работы было достигнуто с помощью резервирования — включения на контроль дополнительно к основным датчикам групповых датчиков, следящих за группами сверхпроводящих элементов. Также в системе датчиков перехода был организован режим проверки в каждой паузе между циклами магнитного поля. Для этого 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 (ДП), который и контролирует его наличие. В случае отсутствия сигнала датчик выдает воздействие на запрет цикла.

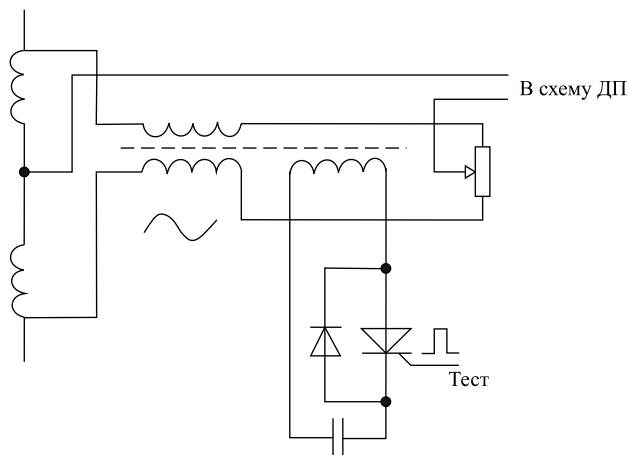


Рис. 2. Схема проверки датчика перехода с использованием трансформатора

На период пуска нуклотрона и проведения первых сеансов эта система удовлетворяла требованиям надежности, но за время длительной эксплуатации устарела и морально, и физически. В ней отсутствовали элементы интерактивного удаленного контроля и управления, элементы гальванической развязки стали деградировать, надежность работы снизилась. В последние 1,5–2 года участились выходы из строя электронных элементов схемы, возможно, из-за накопленного воздействия радиоактивного излучения.

Новая система, основанная на современных технических и конструктивных решениях, была разработана и создана в ходе модернизации ускорительного комплекса нуклотрон. Она была спроектирована на основе использования микроконтроллерного управления. Это позволило все датчики объединить по управлению и передаче информации

на основе последовательных интерфейсов: все датчики подключаются к одной двухпроводной линии, по которой производится обмен информацией. Это решение позволяет при необходимости 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. При этом увеличивается сложность электронных блоков, но становится проще оперативное обслуживание, которое фактически сводится к замене однотипных блоков при неисправности.

1. НОВЫЙ ДАТЧИК ПЕРЕХОДА

Создание новой системы потребовало полной переработки конструкции датчика, необходимой для возможности обмена данными по последовательному каналу. Кроме того, измерительный мост был вынесен из датчика, что позволяет производить его замену без повторной балансировки.

Особенностью конструкции датчиков является то, что они должны быть гальванически изолированы как от общих земляных цепей, так и друг от друга и не вносить паразитные утечки в электрические цепи ускорителя.

В соответствии с этим датчик состоит из двух конструктивных частей: изолированной части, на которой принимается и усиливается входной сигнал, и заземленной части, на которой полученный сигнал обрабатывается, анализируется и т. д.

Изолированная и заземленная части связаны между собой посредством изолирующего аналогового усилителя.

Датчик перехода состоит из следующих узлов (рис. 3). На изолированной части:

- мостовой балансирующий резистор R_{bal} ;
- ограничитель уровня входного сигнала;
- предварительный масштабирующий усилитель с функцией интегрирования;
- аналоговый изолирующий усилитель.

На заземленной части:

- аналоговый изолирующий усилитель;
- амплитудный компаратор;
- аналоговый ключ;
- микропроцессор (МП);
- драйверы шин;
- изолированный DC/DC преобразователь;
- источники питания собственных нужд.

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 заземленную часть датчика через аналоговый изолирующий усилитель. Поскольку обрабатывается только разностный сигнал амплитудой 0–100 мВ, можно

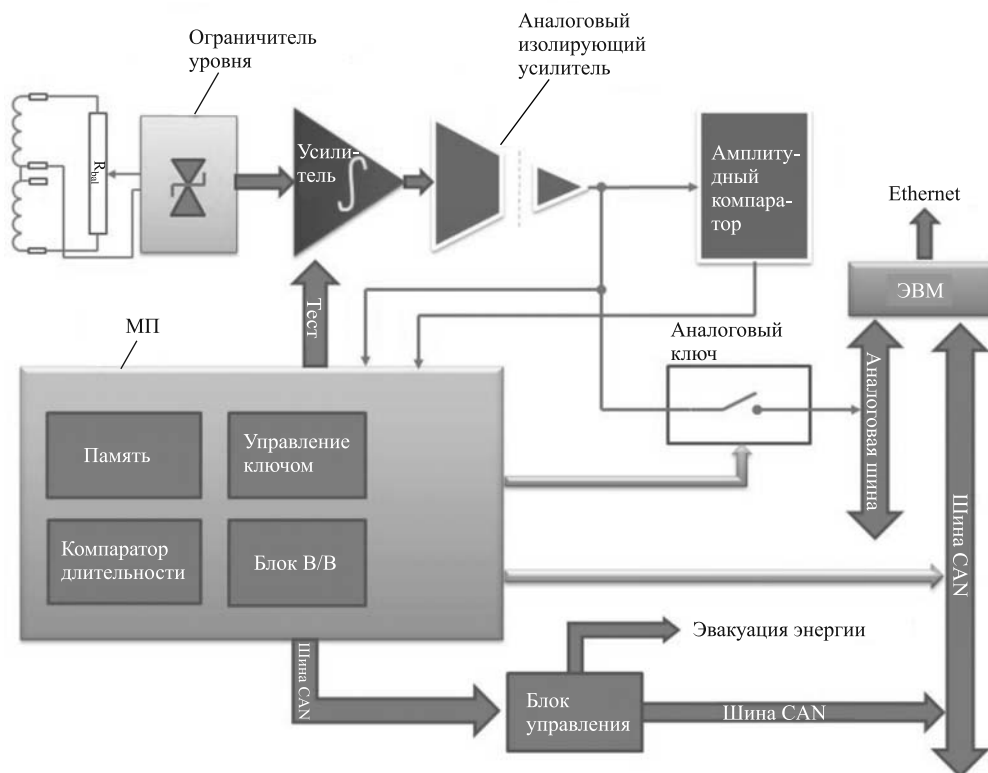


Рис. 3. Блок-схема датчика перехода

использовать достаточно дешевый изолирующий усилитель с небольшим динамическим диапазоном входного сигнала.

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 устройство (ДП) с внешними блоками и ЭВМ по шине CAN, по которой обменивается информацией и управляющими сигналами.

Схема проверки датчика была усовершенствована: вместо громоздкого трансформатора использована схема смещения средней точки (рис. 4). Во время каждой паузы между циклами магнитного поля микроконтроллер формирует сигнал «Тест» для проверки работы всего тракта обработки сигнала и целостности кабельных линий связи.

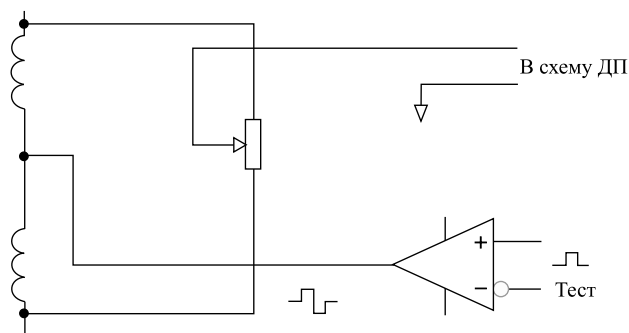


Рис. 4. Схема проверки датчика со смещением средней точки

Средняя точка моста подключена к виртуальному нулю операционного усилителя, который в момент проверки смещается в плюс или минус. Протекающий ток контролируется датчиком перехода. При отсутствии тока генерируется сигнал запрета цикла.

2. ИСПЫТАНИЯ ДАТЧИКА ПЕРЕХОДА

В ходе 39-го сеанса работы нуклотрона (июнь 2009 г.) были проведены испытания макета нового датчика перехода, созданного на основе описанных принципов [5]. Целью испытаний являлась проверка правильности концепции обработки сигнала и отсутствия принципиальных ошибок в схемотехническом построении датчика. Кроме того, было необходимо определить минимальную частоту оцифровки входного сигнала, при которой возможен надежный визуальный контроль формы сигнала разбаланса, а также испытать тракт передачи информации по шине стандарта CAN. Испытания проводились на двух магнитных элементах третьего суперпериода кольца нуклотрона. В течение цикла магнитного поля производился вывод информации на компьютер в реальном времени. Частота дискретизации составляла 62,5 кГц (16 мс). В процессе эксперимента оцифрованный сигнал записывался в файл. При сбалансированном измерительном мосте датчика никаких наводок обнаружено не было. Для наблюдения фаз цикла магнитного поля измерительный мост был незначительно разбалансирован (рис. 5).

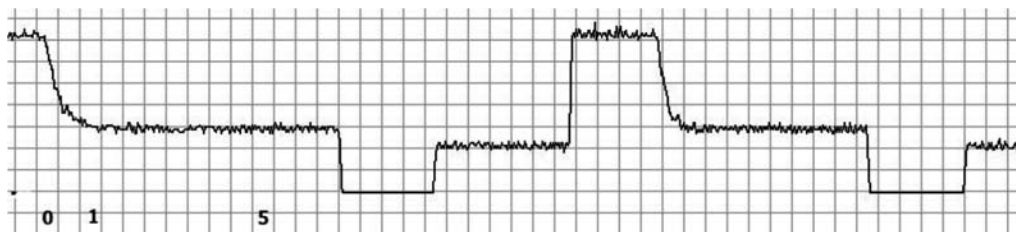


Рис. 5. Сигнал после некоторого разбаланса измерительного моста датчика. Два деления по горизонтальной оси соответствуют 1 с

Вся шкала по вертикальной оси рисунка составляет $\pm 3,3$ В. Таким образом амплитуда положительной полуволны сигнала по вертикальной оси составляет около 3 В, т. е. чуть больше амплитуды порога срабатывания (2,5 В). При этом хорошо видна форма сигнала. Никаких наводок, искажений и т. п. формы сигнала обнаружено не было.

Испытания показали, что данная конструкция датчика вполне работоспособна и может обеспечить визуальный контроль формы сигнала. Следует отметить, что первоначально период дискретизации сигнала планировался от 500 мкс до 5 мс. Работа в условиях реального цикла магнитного поля показала, что уменьшать период оцифровки менее 5 мс нецелесообразно, так как даже при 16 мс форма сигнала прекрасно анализируется. При этом экономится внутренняя память датчика, что ведет к его удешевлению. Тем не менее программно можно увеличить частоту оцифровки сигнала для более точного анализа короткого участка цикла. Кроме того, на основе результатов испытаний был усовершенствован входной усилитель с целью расширить динамический диапазон измеряемого сигнала.

К началу 41-го сеанса (февраль-март 2010 г.) был изготовлен и установлен на нуклотроне прототип датчика [6]. В ходе сеанса были проведены его испытания с главной целью — зафиксировать реальный процесс перехода обмотки в нормально проводящую фазу. Никогда ранее подобные измерения — фиксация перехода и запись визуального отображения процесса в реальном времени — на нуклотроне не проводились.

Для искусственного перевода обмотки магнита в нормально проводящую фазу использовался установленный на ней нагреватель. Для улучшения условий наблюдения сигнала мост датчика был немного разбалансирован, чтобы был виден цикл поля. На рис. 6 показано главное окно программы для наблюдения выходного сигнала датчика. Можно наблюдать фазы выпрямительного режима (рост магнитного поля), «стола» и инверторного режима (спад поля).

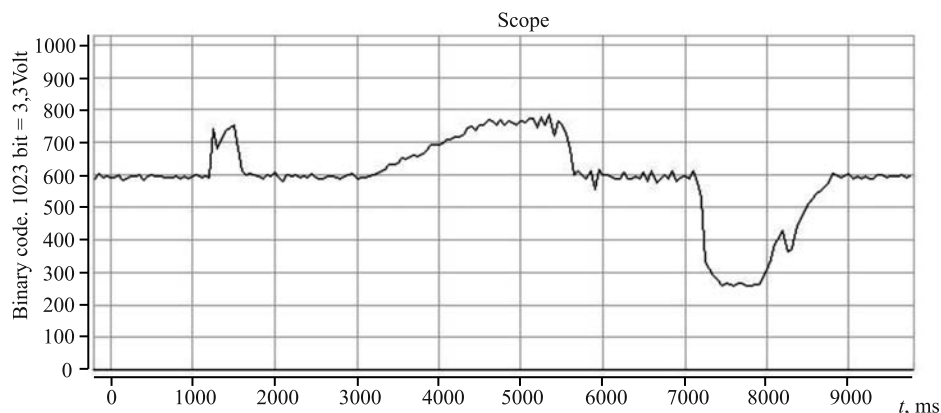


Рис. 6. Главное окно программы для наблюдения выходного сигнала датчика перехода при цикле поля

Нагревание обмотки магнита было произведено при трех напряжениях на нагревателе: 12, 10 и 5 В, при этом выделяемая мощность составляла 17, 12 и 3 Вт соответственно. При первом и втором нагревании активная фаза появлялась и развивалась достаточно быстро — около 25 мс (рис. 7), после чего датчик включал систему эвакуации энергии.

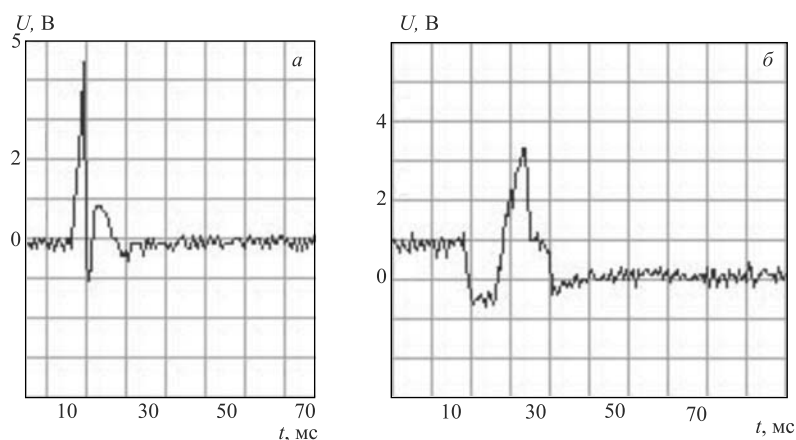


Рис. 7. Сигналы датчика перехода при мощности нагревателя 17 Вт (а) и 3 Вт (б)

При меньшей мощности нагревателя достижение порога срабатывания происходит медленнее.

Таким образом, в результате исследований были получены визуальные отображения процесса перехода в реальном времени при разных энергиях тепловыделения в обмотке магнита. Была продемонстрирована устойчивая и надежная работа датчика, после чего начато изготовление полного комплекта (200 шт. с учетом резервирования).

3. СОСТОЯНИЕ ДЕЛ ПО ВВОДУ СИСТЕМЫ В ЭКСПЛУАТАЦИЮ

К началу 44-го сеанса (декабрь 2011 г.) был изготовлен и установлен на нуклотроне опытный фрагмент новой системы детектирования перехода, включающий в себя 20 датчиков. Аппаратура монтируется в блоках стандарта «Евромеханика» U3 с применением стандартных узлов (источников питания, буферов и т.д.) в стойках 19'' (рис. 8).

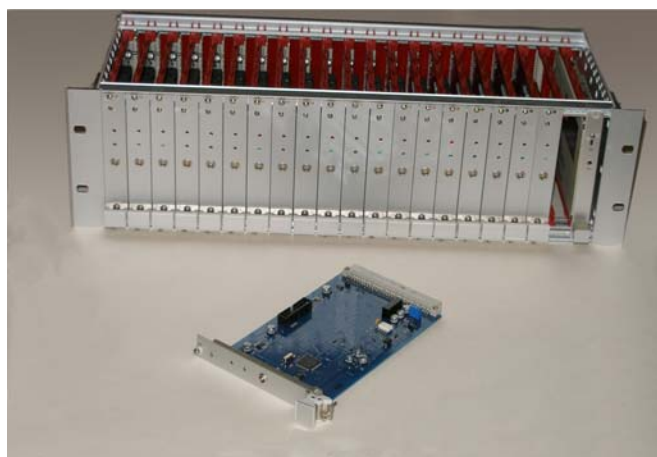


Рис. 8. Датчик перехода и блок, содержащий 20 датчиков

В ходе 44-го и 45-го (февраль-март 2012 г.) сеансов проводилась их опытная эксплуатация, суммарно новые датчики отработали с циклом магнитного поля более 1500 ч. Была продемонстрирована стабильная и надежная работа всех элементов новой системы [7].

В процессе эксплуатации на двух магнитных элементах были выявлены динамические разбалансы во время подачи напряжения цикла. На начальном участке цикла магнитное поле (и, соответственно, ток, протекающий через магнитные элементы) растет со временем по параболическому закону, который затем переходит в линейный. Это соответствует линейному росту напряжения на магнитных элементах в начале цикла и некоторому постоянному значению на участке линейного роста поля. Разбалансы появлялись на участке роста напряжения и стали явно заметны, когда скорости нарастания напряжения были сильно увеличены. При временах нарастания менее 10 мс они стали критическими и приводили к ложному срабатыванию системы эвакуации энергии. Их характер после оцифровки показан на рис. 9. (Для упрощения анализа сигнала мост был незначительно разбалансирован.)

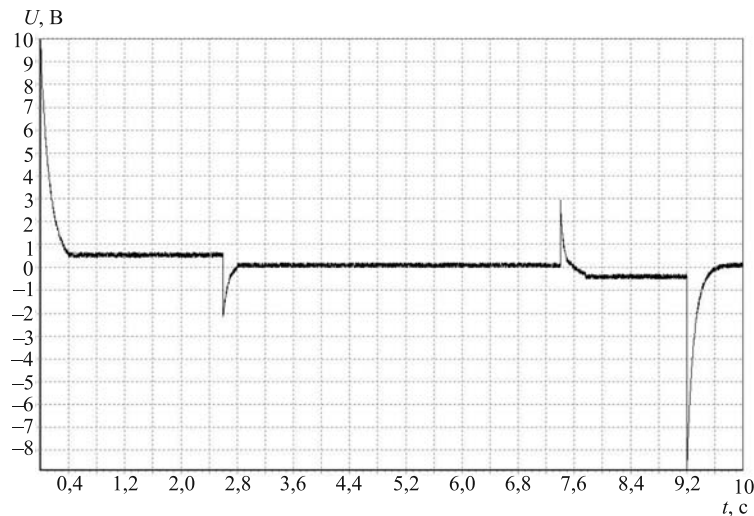


Рис. 9. Сигнал разбаланса в течение цикла магнитного поля

Моделирование работы схемы питания магнитов с использованием PSPICE-симулятора в составе пакета OrCad CADENCE позволило сделать вывод, что это явление обусловлено паразитной емкостью между средней точкой мостовой схемы и землей в цепях вывода сигнала из криостата (рис. 1). При резком возрастании напряжения емкостный ток создает падение напряжения на защитных резисторах в торцах магнитных элементов. При неравенстве величин сопротивлений этих резисторов (а они, как правило, различаются и имеют разброс минимум 10%) и происходит разбаланс моста. В ходе сеансов избежать ложных срабатываний системы защиты удалось за счет удлинения начальных участков параболического роста поля при увеличении темпа роста поля на линейных участках. Для радикальной борьбы с этим эффектом достаточно исключить или значительно уменьшить сопротивление защитных резисторов. По завершении 45-го сеанса на

проблемных элементах защитные резисторы были удалены. В настоящее время полный комплект датчиков изготовлен, вся система смонтирована, полномасштабное внедрение новой системы запланировано на 46-й сеанс работы нуклотрона (ноябрь-декабрь 2012 г.).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе модернизации ускорительного комплекса нуклотрон была создана новая система детектирования перехода сверхпроводящих магнитов в нормально проводящую фазу. Прототипы нового датчика перехода были последовательно протестированы в ходе двух сеансов работы ускорителя. Впервые на нуклотроне были получены визуальные отображения реального процесса перехода обмотки магнита в нормально проводящую фазу. Опытный фрагмент системы, включающий в себя 20 датчиков перехода, отработал в ходе двух сеансов примерно 1500 ч. Была продемонстрирована стабильная и надежная работа всех элементов системы. Система обеспечивает необходимую диагностику всех своих элементов и управляет элементами системы эвакуации энергии. Полномасштабный ввод системы в эксплуатацию запланирован на 46-й сеанс работы нуклотрона (ноябрь-декабрь 2012 г.). На основе технических решений, отработанных в ходе создания и эксплуатации системы детектирования переходов на нуклотроне, разрабатывается система детектирования переходов для бустера нуклотрона, сооружаемого в рамках проекта NICA.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Смирнов А. А., Коваленко А. Д.* Нуклотрон — сверхпроводящий ускоритель ядер в ЛВЭ ОИЯИ: создание, работа, развитие // Письма в ЭЧАЯ. 2004. Т. 1, вып. 6(12). С. 11.
2. *Mess K. H.* Quench Protection at HERA // Proc. of PAC. Washington, 1987. P. 1474–1476; http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/p87/PDF/PAC1987_1474.PDF.
3. *Dahlerup-Petersen K. et al.* // The Protection System for the Superconducting Elements of the Large Hadron Collider at CERN // Proc. of PAC. N. Y., 1999. P. 3200–3202; <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/p99/PAPERS/THP105.PDF>.
4. *Bogdanov I. et al.* Study of the Quench Process in a Fast-Cycling Dipole for the SIS300 Ring // Proc. of EPAC. Lucerne, 2004. P. 1744–1746; <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/e04/PAPERS/WEPKF062.PDF>.
5. *Аверичев А. С. и др.* Итоги 39-го сеанса нуклотрона. Сообщ. ОИЯИ Р9-2009-131. Дубна, 2009.
6. *Аверичев А. С. и др.* Итоги 40-го и 41-го сеансов нуклотрона. Сообщ. ОИЯИ Р9-2010-68. Дубна, 2010.
7. *Ivanov E., Sidorin A., Trubnikov G.* The Quench Detection System for Superconducting Elements of Nuclotron Acceleration Complex // Proc. of RuPAC. Saint-Petersburg, 2012. P. 605–607; <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/rupac2012/papers/weppd024.pdf>.

Получено 19 ноября 2012 г.