

ДАТЧИК ПЕРЕХОДА В НОРМАЛЬНОПРОВОДЯЩУЮ ФАЗУ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ УСКОРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА NICA

Е. В. Иванов, Л. А. Светов, З. И. Смирнова

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Для новых сверхпроводящих ускорителей сооружаемого в ОИЯИ ускорительного комплекса NICA разработан универсальный датчик перехода в нормальнопроводящую фазу. Наличие двухканального цифрового входа позволяет использовать датчик как для сравнения напряжения на соседних магнитах по мостовой схеме, так и для выделения резистивной составляющей напряжения на контролируемом элементе.

The universal quench detector was designed for new superconducting accelerators of the NICA accelerator facility constructing at JINR. The results of tests of its elements and experimental operation are presented. Two digital inputs permit us to use the detector for comparison of voltage at two nearest elements with a bridge scheme and for detection of resistive part of the voltage at the element under control as well.

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

ВВЕДЕНИЕ

Особенностью эксплуатации сверхпроводящих (СП) устройств является необходимость защиты их от повреждения в случае спонтанного перехода обмоток в нормальнопроводящую фазу. Защита СП-магнитов синхротронов основана на системе эвакуации энергии, включающей в себя мощные коммутирующие устройства и резисторы гашения поля. При обнаружении перехода обмотки одного из магнитов в нормальнопроводящее состояние источники питания магнитов отключаются, а коммутирующие устройства вводят в цепь резисторы гашения поля, в которых диссипирует накопленная в магнитах энергия. Детектирование перехода осуществляется специальными датчиками, работающими на основе одного из двух методов: сравнение падений напряжений на двух идентичных, последовательно включенных в цепь питания элементах (как правило, с использованием измерительного моста) либо сравнение падения напряжения на контролируемом элементе с некоторым эталоном.

На момент создания в ОИЯИ СП-синхротрона нуклотрон [1] в мире были разработаны системы защиты для трех СП-ускорительных комплексов: тэватрон (Батавия, США), HERA (Гамбург, Германия) и УНК (Протвино, СССР). Датчики перехода тэватрона были основаны на методе сравнения напряжения с эталоном [2], двух других проектов — на основе мостовой схемы [3,4]. За основу системы защиты нуклотрона была

выбрана мостовая схема как наиболее простая с точки зрения технической реализации. Двадцатилетний опыт эксплуатации ускорителя подтвердил ее надежность. Мостовая схема является одной из основных и в системе детектирования переходов на ЛНС (Женева, Швейцария) [5]. Однако в некоторых случаях, таких как детектирование переходов в силовых тоководах или магистральных СП-линиях, а также при тестировании на стенде отдельных СП-устройств, использование мостовой схемы оказывается недостаточно эффективным.

В рамках реализации проекта NICA (Nuclotron-based Ion Collider fAcility) в ОИЯИ сооружаются две новые СП-ускорительные установки — бустерный синхротрон (бустер) и кольца коллайдера [6]. Для применения на ускорительном комплексе NICA и на стенде по тестированию СП-устройств был разработан универсальный датчик нормальнопроводящей фазы, пригодный для реализации любой из двух возможных схем детектирования.

МЕТОДЫ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ПЕРЕХОДОВ

Для детектирования переходов в нормальнопроводящую фазу обмоток СП-элементов ускорителей используется два метода выявления и измерения активной составляющей сопротивления в контролируемом элементе:

- сравнение напряжения на идентичных, гальванически связанных индуктивных элементах;
- выделение резистивной составляющей в напряжении, измеренном на контролируемом элементе.

В первом методе для сравнения используются либо полуобмотки одного контролируемого элемента (магнита или линзы), либо соседние идентичные элементы, а в качестве измерительного инструмента — мостовая схема, на которой выделяется разностное напряжение при возникновении резистивной составляющей в одном из плеч моста. Это напряжение после усиления и обработки является признаком перехода. Мостовой метод измерения применяется практически на всех СП-ускорителях благодаря надежности, большому динамическому диапазону сравниваемых величин и нечувствительности к ионизирующему излучению ввиду отсутствия активных элементов в мостовой схеме.

При очевидных достоинствах мостовой схемы следует отметить следующие принципиальные ограничения при ее применении.

- Контролируемые элементы должны составлять гальванически связанную пару. Это должны быть либо соседние элементы в схеме ускорителя, либо элемент, имеющий отвод от средней точки. Одиночный элемент контролировать нельзя.
- При возникновении нормальной зоны в месте подключения средней точки и равномерном ее распространении разбаланса моста не произойдет, и переход не будет определен. Для исключения этой ситуации приходится вводить дополнительные дублирующие датчики, плечи моста у которых составлены из нескольких магнитов. Надо отметить, что подобная ситуация на ускорителе нуклотрон за всю историю эксплуатации не наблюдалась ни разу, точно так же как при эксплуатации ускорителя HERA [4].
- Пассивные элементы схемы — проводники, балансирующий резистор, защитные сопротивления и т. п. — имеют собственные паразитные емкости и индуктивности. Так как мост может быть точно сбалансирован только на одной частоте, эти реактивные

элементы оказывают влияние на высших частотах изменения напряжения, что вносит погрешность в измеренное напряжение разбаланса.

Во втором методе для выделения резистивной составляющей из измеряемого сигнала он сравнивается с некоторым опорным сигналом. В качестве опорного сигнала предпочтительно использование производной магнитного поля по времени, которая определяет индуктивную составляющую падения напряжения. Возможно также использование производной по времени от тока, протекающего через контролируемый элемент. При этом производная поля определяется по известной зависимости индуктивности элемента от тока. Разница сигналов падения напряжения на контролируемом элементе и сигнала производной поля, которая вычисляется и анализируется электронной схемой, является признаком перехода в нормальнопроводящую фазу.

Основной трудностью применения метода является отсутствие сигнала производной поля непосредственно в контролируемом элементе. На ускорительном комплексе ЛНС, например, производная тока вычисляется из измеренного протекающего тока через контролируемый элемент путем дифференцирования и обработки с помощью цифрового сигнального процессора. Причем для компенсации фазового сдвига сигнал тока измеряется до и после контролируемого магнита с последующим усреднением и математической обработкой [5].

Также представляет трудность обработка сигналов с большим динамическим диапазоном изменения. Так, на ускорителе нуклотрон сигнал резистивной составляющей ≈ 100 мВ необходимо выделять на фоне динамически меняющихся сигналов уровня от -8 В до $+8$ В (при скорости изменения тока 2 кА/с).

Несмотря на указанные недостатки, в ряде случаев этот метод является незаменимым, так как он позволяет выявлять факт перехода на любых сверхпроводящих устройствах независимо от их конструкции и наличия пары для сравнения.

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ДАТЧИК ПЕРЕХОДА

Для применения на ускорительном комплексе НИСА и на стенде по тестированию СП-устройств был разработан универсальный датчик нормальнопроводящей фазы (рис. 1), состоящий из двух изолированных каналов, каждый из которых может получать аналоговый сигнал с максимальной амплитудой ± 10 В. Чувствительность канала регулируется в широких пределах входными масштабирующими усилителями, поэтому источником сигнала для схемы может быть как сигнал с моста (~ 100 мВ), так и с индуктивного элемента (~ 10 В). Далее входные сигналы преобразуются в цифровой последовательный код 12-разрядными аналого-цифровыми преобразователями (АЦП) 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. Управление и прием данных АЦП-микроконтроллером происходит через цифровые высокоскоростные изоляторы.

В схеме датчика применены современные компоненты, такие как RAILtoRAIL-усилители (LT1880), двухполярные широкодиапазонные АЦП (AD7895), ARM-микроконтроллер на ядре Cortex M3 фирмы NXP (LPC1768). Практически для всех компонентов использован SMD-монтаж (рис. 2).

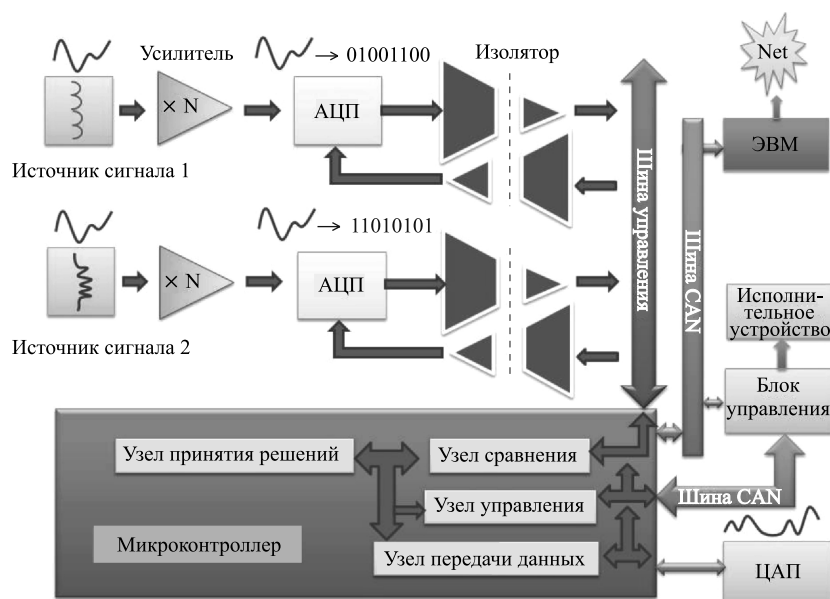


Рис. 1. Блок-схема датчика перехода

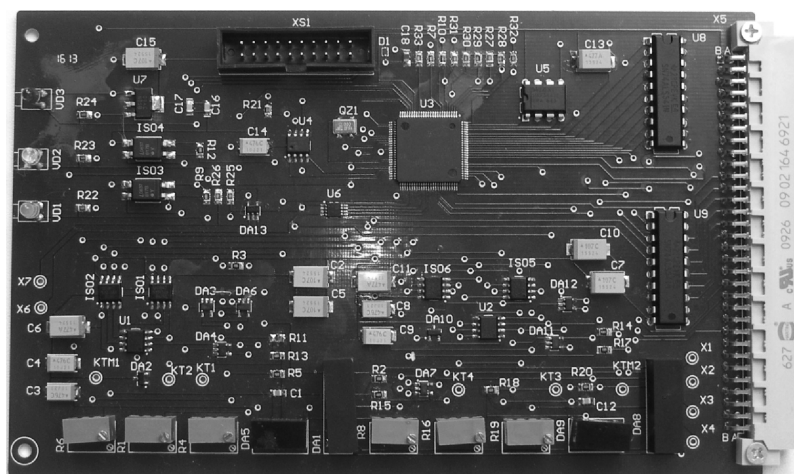


Рис. 2. Плата датчика перехода

Прямое подключение индуктивного элемента позволило усовершенствовать и систему проверки цепей связи и датчика, которая теперь может контролировать гальваническую связь в датчике всех соединений без подачи импульсных сигналов. При подаче тестового напряжения на неинвертирующий вход операционного усилителя напряжение на выходе усилителя обуславливается делителем R–R и равно половине тестового, если нет обрыва, и равно тестовому, если есть обрыв. Измеряя выходное напряжение усилителя, легко определить целостность цепей связи.

ПОДАВЛЕНИЕ ПОМЕХ

В ходе модернизации ускорительного комплекса нуклотрон была разработана и введена в эксплуатацию новая система детектирования переходов, в которой мостовой датчик реализован на основе современных технических и конструктивных решений [7]. Ее использование обеспечило безопасную эксплуатацию магнитной системы нуклотрона при поле дипольных магнитов, близком к максимальному проектному, например, в марте 2013 г. пучок дейтронов был ускорен до энергии 5,1 ГэВ/нуклон. Кроме того, система управления датчиками перехода позволяет анализировать все случаи срабатывания защит, что дает экспериментальный материал для дальнейшего развития конструкции датчика. В первую очередь это относится к выявлению причин и исключению случаев срабатывания защит при отсутствии перехода элементов в нормальнопроводящую фазу.

Критерием наличия перехода является одновременное превышение порога по амплитуде напряжения V_{th} и по длительности T_v (validation time). Пороговые значения выбираются таким образом, чтобы при известных характеристиках системы эвакуации энергии, с одной стороны, заведомо исключить перегрев контролируемого элемента в случае перехода, с другой стороны, эффективно отстроиться от влияния кратковременных импульсных помех.

Проектные значения порогов на ускорителе нуклотрон были установлены равными $V_{th} = 60$ мВ и $T_v = 1,5$ мс (что несколько меньше обычно применяемых значений на других ускорительных комплексах). Впоследствии, по мере накопления опыта эксплуатации магнитной системы, значение T_v было увеличено до 5 мс.

Для примера на рис. 3 изображен типовой сигнал с датчика перехода нуклотрона при обнаружении перехода и срабатывании защиты, на котором видно, что имеющийся шум много меньше установленного порога срабатывания.

Тем не менее на кольце ускорителя имеются места, где отмечается большая зашумленность входного сигнала датчика. Это связано с тем, что рядом с контролируемым элементом и линиями связи расположены мощные нагрузки и другие установки, излуча-

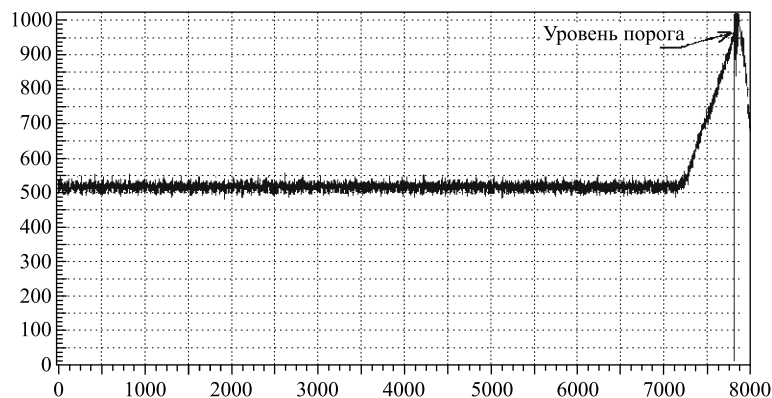


Рис. 3. Пример оцифрованного сигнала датчика при обнаружении перехода. По вертикальной оси — цифровой отсчет измерительного АЦП, вся шкала соответствует 3,3 В, нулевой уровень — примерно 500. По горизонтальной оси — время (в сотнях миллисекунд, т. е. вся шкала 800 мс). Вертикальная линия обозначает момент времени срабатывания системы эвакуации энергии

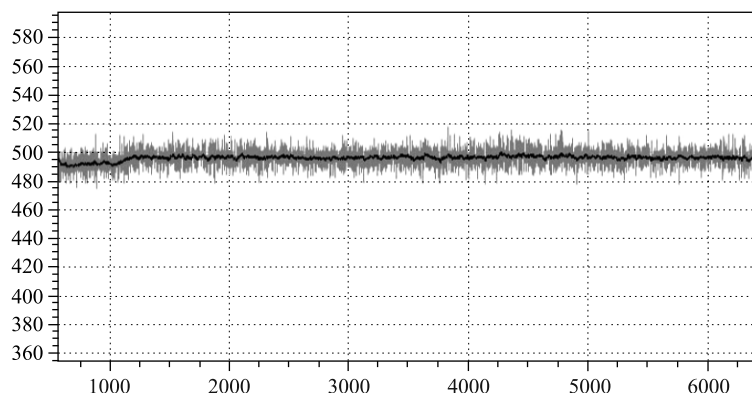


Рис. 4. Сигнал с датчика перехода на входе (серая кривая) и выходе (черная кривая) фильтра. Единицы измерения по осям те же, что и на рис. 3

ющие помехи. Для подавления таких шумов в новом датчике применен метод цифровой фильтрации входного сигнала.

К цифровому фильтру в датчике предъявляются жесткие требования:

- работа в реальном времени при единичном семплировании с периодом 4,8 мкс;
- минимальная временная задержка сигнала;
- отсутствие фазовых искажений;
- минимальная реакция на скачок входного сигнала;
- простой алгоритм реализации.

По заданным критериям был выбран фильтр низкой частоты, реализованный методом скользящего среднего. Применение фильтра показало хорошие результаты на реальном сигнале с датчика перехода (рис. 4).

Степень подавления шума регулируется программным изменением коэффициента фильтра. Таким образом можно настраивать датчик индивидуально для каждого конкретного его расположения на кольце ускорителя. Следует иметь в виду, что фильтр вносит временную задержку в исходный сигнал (в зависимости от коэффициента от 500 мкс до 2 мс), поэтому требуется корректировка установок датчика при его применении.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе опыта эксплуатации системы детектирования переходов СП-синхротрона нуклотрон разработан новый универсальный датчик перехода, предназначенный для применения на ускорительном комплексе НИСА. Правильность концепции обработки сигнала и отсутствие принципиальных ошибок в схемотехническом построении были проверены на макете датчика. В настоящее время изготовлен прототип, испытание которого включено в программу ближайшего сеанса нуклотрона. Начало серийного изготовления датчиков намечено на 2014 г.

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, № 6(123). С. 11.
2. *Flora R. et al.* The Energy Saver/Doubler Quench Protection Monitor System // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1981. V. NS-28, No. 3.

3. Афанасьев О. В. и др. Система детектирования нормальной фазы сверхпроводящих магнитов УНК // Тр. XIII Всерос. совещ. по ускорителям заряженных частиц. Протвино, 1992. Т. 2. С. 350–355.
4. Mess K. H. Quench Protection at HERA // Proc. of PAC 1987. Washington, 1987. P. 1474–1476; http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/p87/PDF/PAC1987_1474.PDF.
5. Dahlerup-Petersen K. et al. The Protection System for the Superconducting Elements of the Large Hadron Collider at CERN // Proc. of PAC 1999. N. Y., 1999. P. 3200–3202; <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/p99/PAPERS/THP105.PDF>.
6. Kekelidze V. et al. NICA Project at JINR // Письма в ЭЧАЯ. 2012. Т. 9, № 4–5(174–175). С. 521–526.
7. Иванов Е. В. и др. Система детектирования перехода в нормальнопроводящую фазу сверхпроводящих магнитов ускорительного комплекса нуклотрон // Письма в ЭЧАЯ. 2013. Т. 10, № 4(181). С. 603–612.

Получено 9 декабря 2013 г.