

СИСТЕМА ТЕРМОМЕТРИИ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ МАГНИТОВ БУСТЕРА NICA

*В. И. Волков, Е. В. Горбачев, А. Е. Кириченко, Н. В. Пиляр,
С. В. Романов, Г. С. Седых¹, Р. А. Смолков*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Ускорительный комплекс NICA создается на базе Объединенного института ядерных исследований в Дубне для проведения физических экспериментов на встречных пучках тяжелых ионов. Он состоит из инжекционного комплекса, бустерного синхротрона, модернизированного синхротрона нуклотрон и коллайдера тяжелых ионов. Производится монтаж бустера. В докладе описывается система, созданная в ЛФВЭ ОИЯИ, для осуществления точного измерения температур сверхпроводящих магнитов бустерного синхротрона. Система термометрии состоит из более чем 240 резистивных датчиков температуры типа ТВО, системы сбора данных National Instruments, программного обеспечения на базе технологии Tango Controls и веб-клиентского приложения.

NICA is a new accelerator complex being constructed at the JINR aimed to provide collider experiments with heavy ions. It consists of injection complex, booster synchrotron, upgraded Nuclotron and ion collider. The superconducting booster synchrotron is being assembled presently. The report describes a system, developed at JINR, to perform precise temperature measurement of NICA booster superconducting magnets. Thermometry system consists of more than 240 resistive TVO temperature sensors, National Instruments PXIe controllers and data acquisition modules, Tango-based software and web-based client application.

PACS: 29.20.db; 29.20.dk; 07.07.Df; 07.05.Fb; 07.05.Hd

ВВЕДЕНИЕ

В Лаборатории физики высоких энергий Объединенного института ядерных исследований осуществляется монтаж нового сверхпроводящего бустерного синхротрона тяжелых ионов [1]. Он является составным элементом большого строящегося ускорительного комплекса NICA. Сверхпроводящие магниты для проекта NICA производятся в Дубне. Точный контроль температуры на ярмах и обмотках магнитов и линз крайне важен для любого сверхпроводящего ускорителя. Авторами приводится описание системы термометрии сверхпроводящих магнитов бустерного синхротрона, созданной в ЛФВЭ ОИЯИ. Аппаратные и программные решения были протестированы и отлажены за 5 лет при работе испытательного стенда криогенных магнитов [2].

¹E-mail: georgy.sedykh@gmail.com

ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ СИСТЕМЫ

Бустерный синхротрон проекта NICA делится на четыре сверхпроводящих суперпериода с поворотными магнитами и линзами и четыре теплых прямолинейных участка. Структурная схема бустера приведена на рис. 1. Каждый суперпериод содержит 10 дипольных магнитов и 6 дублетов линз. На каждом дипольном магните установлено 3 датчика температуры, на дублете линз — 4 датчика. Применяются резистивные сенсоры типа ТВО. Задачей системы термометрии является надежное и стабильное измерение температур магнитов. Необходимо наличие удобного операторского интерфейса и возможность просмотра архивных данных. Для каждого суперпериода система термометрии является независимой как на аппаратном, так и на программном уровне. Клиентское приложение отображает данные со всех суперпериодов. Всего система насчитывает более 240 измерительных каналов.

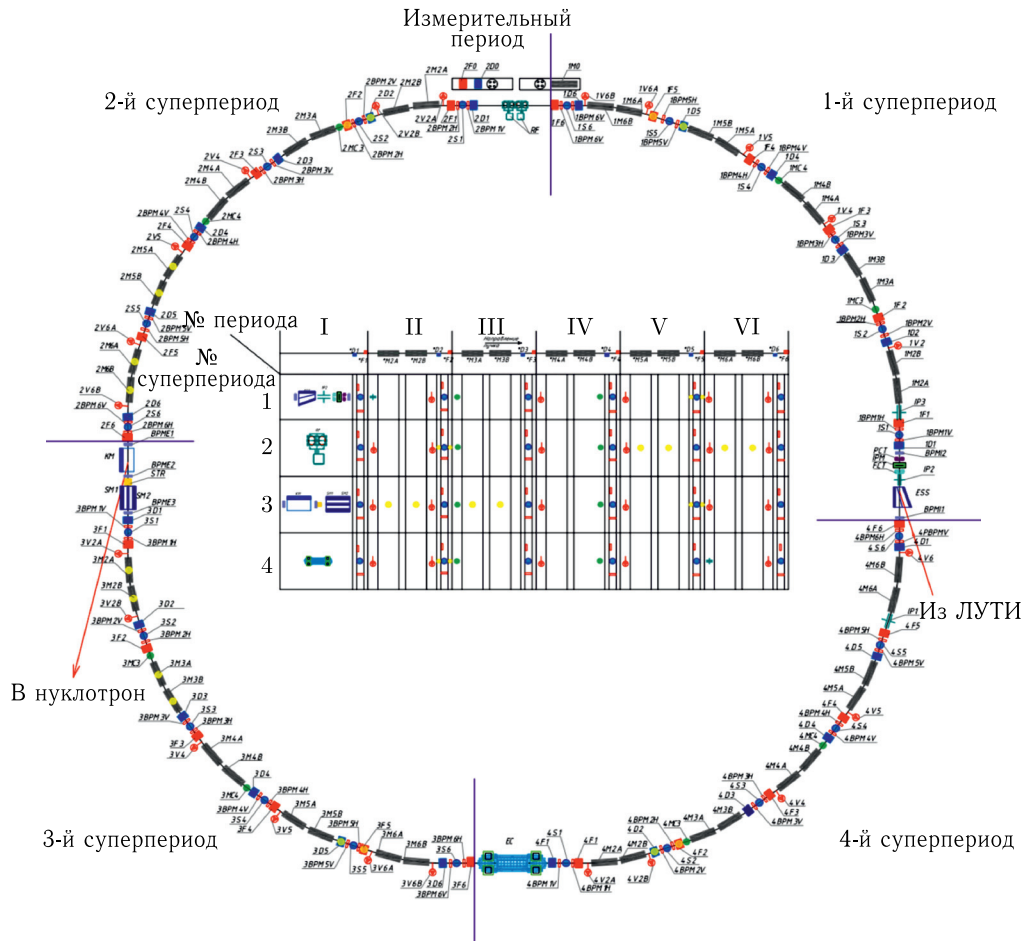


Рис. 1. Структурная схема бустера комплекса NICA

ОБОРУДОВАНИЕ

В качестве датчиков температуры используются резистивные сенсоры типа ТВО [3]. При комнатной температуре они имеют сопротивление от 910 до 1100 Ом. При температуре ~ 4 К их сопротивление возрастает до 4,5 кОм. Структура измерительной схемы представлена на рис. 2. Температурные датчики в пределах суперпериода соединены в цепь последовательно. Для вычисления сопротивления датчика необходимо измерить падение напряжения на нем и ток, протекающий через него. Ток в гирлянде задается при помощи прецизионного источника тока фирмы LakeShore, равного 10 мкА. Определение тока осуществляется через измерение падения напряжения на шести прецизионных резисторах, включенных в гирлянду через равные промежутки. Прецизионные резисторы на 5 кОм от фирмы Vishay имеют высокую точность (0,01 %) и низкий коэффициент температурного дрейфа (2 ppm/°C). Сигнальные линии выполнены из акустического кабеля Tasker C316, имеющего 16 экранированных витых пар в общем экране. Общий экран соединяется с заземлением с двух сторон, а отдельные экраны заземляются с одной стороны. Это позволяет уменьшить воздействие как высокочастотных, так и низкочастотных наводок. В качестве измерительной аппаратуры используются модули National Instruments PXIe-4357 Temperature Input Modules. Это 20-канальные 24-битные сигма-дельта АЦП, выполненные в формате PXI Express. Для измерения температуры на каждом суперпериоде используются по 5 таких модулей, смонтированных в отдельном шасси. Для работы измерительного программного обеспечения в каждое шасси подключен контроллер PXIe от National Instruments, содержащий промышленный компьютер с операционной системой Windows 7. Смонтированное оборудование для одного суперпериода представлено на рис. 3.

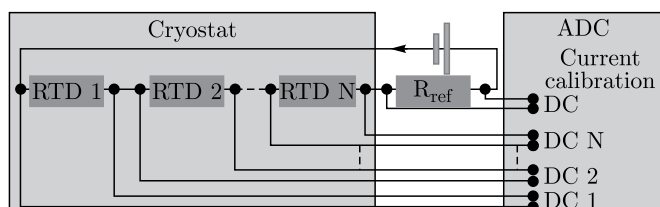


Рис. 2. Измерительная схема



Рис. 3. Стойка с оборудованием

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Программное обеспечение системы термометрии выполнено на базе технологии Tango Controls [4]. Сбор данных с модулей АЦП производится при помощи Tango-модуля DAQmxPXIe4357 [5]. Для каждого суперпериода используется по 5 Tango-устройств этого типа. Исполняются они на контроллерах NI PXIe, установленных в одном шасси с модулями ввода. Результатом работы этих модулей являются измеряемые значения напряжений на каждом из каналов АЦП. Tango-устройством верхнего уровня является модуль ThermoUnit [6]. Он получает измененные напряжения в пределах своего суперпериода, вычисляет ток в измерительной цепи, сопротивления датчиков и температуры. Пересчет измеренного сопротивления в температуру осуществляется при помощи полинома шестой степени с семью калибровочными коэффициентами. Для каждого датчика эти коэффициенты указаны в паспорте изделия. Конфигурация измерительных каналов и калибровки датчиков задаются через центральную конфигурационную базу данных MySQL. Устройства верхнего уровня выполняются в виртуальной машине в основном серверном центре системы управления ускорительного комплекса NICA. В качестве системы хранения применяется стандартный механизм архивации системы Tango Controls — HDB++ [7]. Для осуществления контроля доступа к Tango-устройствам и логирования применяется механизм серверной проверки прав, основанный на ролях [8]. Для предоставления доступа к устройствам Tango через браузер при помощи стандартного протокола http(s) применяется разработанная на C++ реализация стандартного Tango REST API под названием RestDS [8].

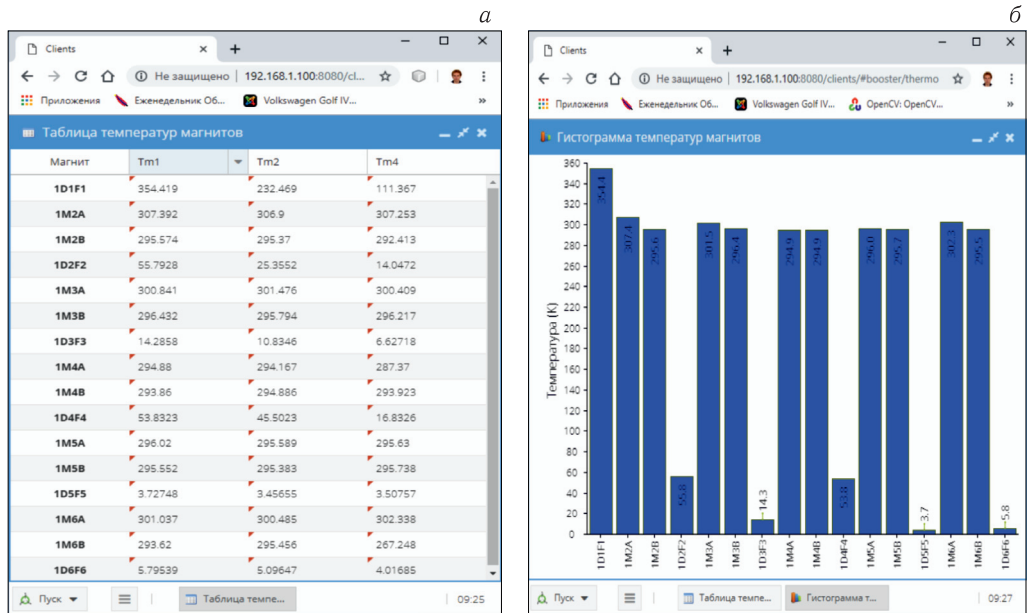


Рис. 4. Веб-клиентское приложение термометрии бустера. Отображение данных: а) в виде таблицы; б) в виде гистограммы

Клиентское приложение выполнено в виде одностраничного веб-приложения [10], которое позволяет просматривать измеренные значения температур в виде таблицы, гистограммы, данных на мнемосхеме ускорителя, а также линейных графиков от времени. Разрабатывается виджет для просмотра архивных данных с необходимых датчиков. Веб-приложение разработано в версиях для стандартного компьютера и для мобильного устройства. Выбор версии осуществляется автоматически. Внешний вид клиентского приложения представлен на рис. 4.

ВЫВОДЫ

1. Разработана и смонтирована система термометрии сверхпроводящих магнитов для бустерного синхротрона ускорительного комплекса NICA.
2. Система создана на аппаратной и программной базе, опробованной в ходе 5 лет непрерывной работы стенда криогенных испытаний сверхпроводящих магнитов ускорительного комплекса NICA, с учетом достоинств и недостатков прототипа.
3. Точность измерения падения напряжения на датчике температуры ~ 10 мкВ на уровне шкалы 80 мВ ($\sim 0,0125\%$).
4. Разработано удобное веб-клиентское приложение, адаптирующееся к любым типам устройств.
5. До конца 2019 г. запланировано добавить систему термометрии измерительного периода, провести финальную отладку и ввести в эксплуатацию систему термометрии в полном объеме в ходе первого технического сеанса бустера NICA.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Tuzikov A. et al.* Booster Synchrotron at NICA Accelerator Complex // Proc. of RuPAC 2016, St. Petersburg, Russia, 2016. P. 160–162.
2. *Gorbachev E. V. et al.* The Thermometry System of Superconducting Magnets Test Bench for the NICA Accelerator Complex // Phys. Part. Nucl. Lett. 2016. V. 13, No. 5. P. 598–600.
3. *Filippov Y. P., Miklyaev V. M.* A Comparison of Two Kinds of TVO Cryogenic Temperature Sensors // Cryogenics. 2019. V. 100. P. 85–91.
4. TANGO Controls. <http://www.tango-controls.org/>.
5. Tango-драйвер модуля NI PXIe-4357. <http://tangodevel.jinr.ru/git/tango/hardware/ni/DAQmxPXIe4357>.
6. Tango-класс высокоуровневого устройства системы термометрии. <http://tangodevel.jinr.ru/git/tango/thermo/ThermoUnit>.
7. Документация по архивации данных в системе Tango Controls. <http://tango-controls.readthedocs.io/en/latest/tools-and-extensions/archiving/HDB++.html>.
8. *Gorbachev E. V., Sedykh G. S.* Development of NICA Control System: Access Control and Logging // Proc. of ICALEPCS-2017, Barcelona, Spain, 2017. P. 822–825.
9. *Sedykh G. S., Gorbachev E. V., Elkin V. G.* Tango Web Access Modules and Web Clients for NICA Control System // Ibid. P. 806–808.
10. Термометрия бустера NICA. <http://tangoapps1.jinr.ru/booster-thermo>.