

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА

УДК 681.5

СИСТЕМА КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ СТЕНДА ДЛЯ
ИССЛЕДОВАНИЯ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ МАГНИТОВ ФИНАЛЬНОЙ
ФОКУСИРУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ¹

©2024 г. С. С. Козуб^а, А. И. Агеев^а, Р.В. Антоненц^а, А. П. Орлов^а,
М. Н. Столяров^а, А. С. Власов^а

^аИнститут физики высоких энергий имени А.А. Логанова

Национального исследовательского центра “Курчатовский институт”

Россия, 142281, г. Протвино, Московская обл., ул. Победы, 1

Поступила в редакцию 24.11.2023 г.

После доработки 23.03.2024 г.

Принята к публикации 06.05.2024 г.

НИЦ “Курчатовский институт”–ИФВЭ разработал сверхпроводящие квадрупольные магниты для системы финальной фокусировки пучков тяжелых ионов коллаборации HED@FAIR международного ускорительного комплекса ионов и антипротонов FAIR в Дармштадте, Германия. Для исследования этих магнитов в различных режимах работы создан стенд, оснащенный системой контроля и управления. Система обеспечивает контроль и управление температурой, давлением в емкостях и трубопроводах, величиной изоляционного вакуума, уровнем и расходом жидкого гелия и азота – всего 46 каналов. Все параметры стенда записываются в архив испытаний и хранятся в формате “.xls” таблиц и “.tdms” файлов на пульте оператора.

1. ВВЕДЕНИЕ

В рамках проекта HED@FAIR НИЦ “Курчатовский институт”–ИФВЭ создает четыре квадрупольных магнита с уникальным сочетанием внутреннего диаметра сверхпроводящей обмотки 260 мм и градиента магнитного поля 37.5 Тл/м (рис.1). Номинальный ток магнита равен 5.73А, максимальное поле в сверхпроводящей обмотке 5.87 Тл, запасенная энергия 1.08

¹ Материалы 28-й конференции по ускорителям заряженных частиц “RuPAC’23”, Новосибирск.

МДж [1–4]. Двухслойная сверхпроводящая обмотка сжата воротниками из нержавеющей стали, вокруг которых расположен магнитопровод. Длина и наружный диаметр вакуумного сосуда составляют 2.4 м и 1.4 м соответственно. Холодная масса магнита весом 6.5 т охлаждается потоком гелия, имеющим температуру 4.5 К. Общий вес квадруполья равен 10 т. Гелиевый сосуд с холодной массой при помощи системы подвесок крепится к вакуумному сосуду, между стенками вакуумного сосуда и стенками гелиевого сосуда находится тепловой экран, охлаждаемый потоком гелия с температурой 50 К.

Рис. 1. Поперечное сечение квадруполья FFS.

2. ОПИСАНИЕ СТЕНДА

Схема стенда для исследования сверхпроводящих квадрупольных магнитов представлена на рис.2. Основу стенда составляют холодильная гелиевая установка (ХГУ) производительностью 150 л/час, сателлитный рефрижератор производительностью до 400 Вт при температуре охлаждающего гелия от 4.5 до 280 К и его расходе до 40 г/с [5]. Рабочее давление гелия в ожижителе и рефрижераторе 20–23 бар.

Рис. 2. Схема стенда для исследований сверхпроводящих квадрупольей

Основными измеряемыми параметрами стенда являются:

- температуры в переохладителе (T_{21} – T_{24}), распределительном боксе (T_{31} – T_{33}) и на внешних стенках гелиевых и азотных трубопроводов (T_{14} , T_{15} , T_{34}), всего 10 термометров;
- уровень жидкого гелия и уровень жидкого азота в переохладителе, всего 2;
- уровень газгольдера;
- давление на различных участках трубопровода и емкостях стенда (P_1 , P_{14} , P_{15} , P_{21} , P_{22} , P_{51}), всего 6;
- вакуум в емкостях и секциях трубопроводов, всего 16;
- расход гелия G_{11} , G_{61} и азота G_{31} , всего 3.

Общее количество измерительных каналов 37. В качестве устройств управления выступают дистанционно управляемые вентили с электропозиционерами CV_{12} , CV_{13} , CV_{21} , CV_{22} , CV_{32} , CV_{33} , CV_{51} и электроклапаны: CV_{01} и CV_{71} . Количество каналов управления 9.

3. ТЕХНИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ СИСТЕМЫ

Устройства, входящие в измерительную часть системы, должны выполнять преобразования амплитуд аналоговых сигналов всех приведенных в описании технологических

параметров исследуемых магнитов в числовые выражения двоичного кода. Для постоянных и медленно меняющихся во времени параметров выполняются одноразовые преобразования непосредственно по требованию ЭВМ. При измерениях остальных параметров, которые отражают динамические процессы в магните и где требуется построение временных диаграмм, преобразование амплитуды каждого аналогового сигнала должно выполняться периодически через определенные промежутки времени, с начала и до завершения контролируемого процесса. В связи с относительно небольшим количеством измеряемых показателей, а также большой удаленностью датчиков стенда от пульта оператора решено по возможности использовать оборудование с унифицированным токовым сигналом 4–20 мА.

На рейке DIN_1 стойки управления стенда расположены элементы питания для датчиков давления, на DIN_2 – модули сбора сигналов с платиновых термометров, датчиков давления и расходомеров, DIN_3 отвечает за питание и управление электроклапанами CV_{01} и CV_{71} . На рейке DIN_4 расположено шасси Compact RIO, отвечающее за управление и контроль дистанционно управляемых вентилей стенда. Блок IT_{16} , обрабатывающий показания термометров ТВО установлен в отдельном крейте, расположенном внизу стойки. Для обработки полученных сигналов с датчиков и генерации управляющих воздействий используется оборудование отечественной фирмы ОВЕН, в частности модули аналогового ввода MB_{110} , модули дискретного вывода MV_{110} , преобразователи интерфейсов AC_4 и блоки питания постоянного тока.

Управление электропозиционерами вентилей обеспечивается через модули аналогового вывода сигналов NI 9219 и модули ввода NI 9212 (обратная связь) шасси National Instruments Compact RIO. Данное шасси обладает повышенной помехоустойчивостью и защитой от отключения питания, что позволяет обезопасить работу стенда в случае внештатной ситуации. Модули ввода аналоговых сигналов MB_{110-8A} обрабатывают информацию, полученную со следующих устройств стенда: датчиков давления “Метран-150” избыточного и абсолютного давления; датчиков давления ПД-100; расходомеров YOKOGAWA; платиновых термометров, установленных на внешней поверхности трубопроводов; гелиевых и азотных уровнемеров, подключаемых через модуль LM-500. Данные устройства подключены по интерфейсу “токовая петля” 4–20 мА и 0–5 мА в зависимости от типа устройства. Для обеспечения питания датчиков давления и расходомеров в схему подключения встроены блоки питания автоматики постоянного тока. Связь с пультом оператора обеспечивается через интерфейс RS485, которым снабжены все модули. Непосредственно у пульта расположены преобразователи интерфейса RS485-USB которые передают информацию на ПК.

Для измерения вакуума используются следующие датчики: ПМТ-4М (диапазон измерения $5 \cdot 10^{-1}$ – 10^{-4} мм. рт. ст.); Edwards APG-100XLC (диапазон 10^3 – 10^{-4} мбар); Edwards WRG-S

(диапазон 10^3 – 10^9 мбар). Сигналы с них передаются на промежуточные устройства отображения, в случае с ПМТ это МЕРАДАТ-ВИТ16Т3 (одноканальные), для датчиков EDWARDS – контроллеры ТИС-3 и ТИС-6 (на 3 и 6 каналов, соответственно). После предварительной обработки, информация с датчиков поступает на пульт контроля изоляционного вакуума стенда. Передача от контроллеров до пульта осуществляется по стандарту RS-485.

Модуль дискретного вывода MU_{110} используется в системе для осуществления управления электроклапанами CV_{01} , CV_{71} модели ASKA PRO142. Особенностью данных модулей является питание переменным током 36 В, что несвойственно устройствам автоматики. Для решения этой проблемы были использованы понижающие трансформаторы 220/36.

Открытие/закрытие клапанов проводится командой оператора с пульта управления стендом. Также индикация текущего состояния клапана отображается индикацией на самом модуле. Шасси Compact RIO обеспечивает управление электропозиционерами Siemens и Samson, установленными на дистанционно-управляемых вентилях стенда. Управляющий сигнал регулировки степени открытия вентиля поступает от пульта оператора по отдельному каналу Ethernet через четырехканальные модули выхода NI 9265, установленными в шасси. Обратная связь с ЭВМ о текущем состоянии вентиля осуществляется через модули аналогового ввода сигналов NI 9219. В случае пропажи питания шасси сохраняет последнее заданное положение вентиля, либо переводит их в безопасное для работы установки положение в зависимости от указанных настроек.

Непосредственно у пульта оператора расположены преобразователи интерфейсов RS 485 и CAN, необходимые для вывода данных на ПК. Там же установлен лабораторный источник питания EA-PS 2042-20В, через который осуществляется управление мощностью нагревателя, смонтированного на дне переохладителя. Источник имеет два режима управления: ручной – посредством регулирования напряжения и силы тока на приборе и дистанционный – на мнемосхеме пульта оператора путем ввода необходимого значения мощности, что возможно благодаря встроенному в источник интерфейсу USB.

4. ПРОГРАММНАЯ ЧАСТЬ СИСТЕМЫ

Программная часть стенда для исследования сверхпроводящих квадрупольей представляет собой мнемосхему с интерактивными графическими элементами, физически расположенную на компьютере (пульт оператора), и доступную в режиме чтения по протоколу RDP пользователям, находящимся вне стенда. Таким образом, заинтересованные лица могут наблюдать за текущими процессами в реальном времени удаленно.

Мнемосхема позволяет осуществлять как ручное управление вентилями и клапанами стенда, так и вести автоматический режим регулировки ряда показателей в зависимости от уставок, назначенных оператором. За динамикой происходящих процессов можно наблюдать при помощи графиков, вынесенных в правую часть интерфейса. На пульте оператора эти графики вынесены на отдельный дисплей, а для удаленного пользователя отображаются на объединенном экране. Элементы интерфейса для просмотра дополнительной информации по датчикам и конечным устройствам вынесены на отдельные вкладки мнемосхемы. Для оператора данная информация была бы излишней, поэтому она вынесена на отдельную вкладку мнемосхемы.

Управление уровнем азота, поступающего в испаритель, производится автоматически. Для этого используется функционал дистанционно управляемого электроклапана CV_{71} , который расположен на выходе азотного трубопровода и в зависимости от текущей температуры в распорядительном боксе и уровне расхода на участке “квенч–рессивер” производит открытие/закрытие, регулируя поток выходящего газа.

Все автоматические режимы при желании оператора могут быть отключены, после чего стенд переходит в режим ручного управления. Это полезно в случаях проведения испытаний нового оборудования, а также при наладке новых режимов регулирования охлаждения/отопления. Все параметры стенда записываются в архив испытаний и хранятся в формате “.xls” таблиц вида “дата–параметр–значение” на пульте оператора. В дальнейшем планируется организовать резервное сохранение данных на удаленный сервер-архив.

Программа написана на LabView 2014 developer edition с использованием библиотек, предоставляемых производителями для дистанционно управляемых вентилях WEKA и лабораторного источника питания EA-PS 2042-20B. Выбор LabView обусловлен разнообразием используемых на стенде приборов и элементов управления, что при выборе более узкоспециализированного языка вызвало бы задержки в проектировании.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создана система контроля и управления параметрами стенда для исследования сверхпроводящих квадрупольных магнитов системы финальной фокусировки пучка ионов. Она имеет 37 каналов для измерения температуры, давления, вакуума, уровня и расхода жидкого гелия и азота в узловых точках стенда и 9 каналов для их регулировки. Система позволяет осуществлять как ручное управление вентилями и клапанами стенда, так и вести автоматический режим регулировки ряда параметров. За динамикой происходящих процессов можно

наблюдать при помощи графиков, вынесенных на компьютер. Все параметры стенда записываются в архив испытаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Tkachenko L., Ageyev A., Altukhov Y., et al.* // Proc. RUPAC'18. Protvino, Russia. 2018. P. 78.
<http://doi.org/10.18429/JACoW-RUPAC2018-WECBMH03>
2. *Tkachenko L., Ageev A., Altuhov Yu., Bogdanov I., Kashtanov E., Kozub S., Varentsov D., Zinchenko S.* // Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. A. V. 941. P. 162323.
<https://doi.org/10.1016/j.nima.2019.06.064>
3. *Агеев А.И., Алтухов Ю.В., Богданов И.В., Каштанов Е.М., Козуб С.С., Слабодчиков П.И, Ткаченко Л.М.* // Вопросы Атомной Науки и Техники. Серия: Материаловедение и новые материалы. 2020. №4 (105). С. 28.
4. *Tkachenko L., Altukhov Y., Bogdanov I., et al.* // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2022. V. 32. №4. P. 4000105. <https://doi.org/10.1109/TASC.2022.3141979>
5. *Ageev A.I., Altuhov Yu.V., Stolyarov M.N., Kozub S.S.* // Cryogenics 2021 online. Proceedings of the 16th IIR International Conference, October 5–7. 2021.
<http://doi.org/10.18462/iir.cryo.2021.0003>

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. Поперечное сечение квадруполя системы финальной фокусировки пучка ионов.

Рис. 2. Схема стенда для исследований сверхпроводящих квадруполей: *CV* – дистанционно управляемые вентили, *T* – термометры сопротивления, *P* – датчики давления, *G* – расходомеры, *SV* – предохранительные клапаны, *HV* – вентили с ручным управлением, *NV* – обратные клапаны, *TO* – теплообменники.

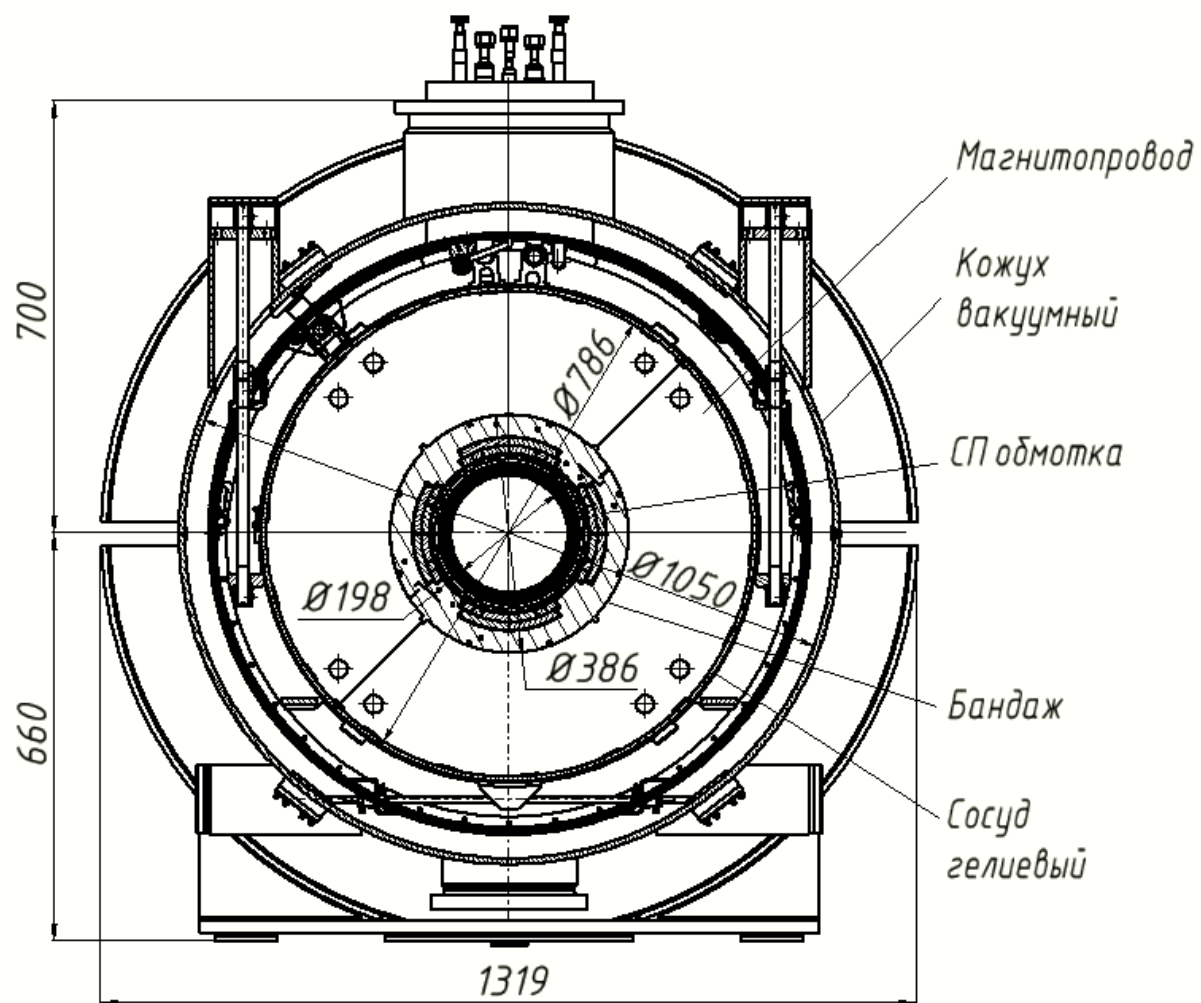


Рис. 1

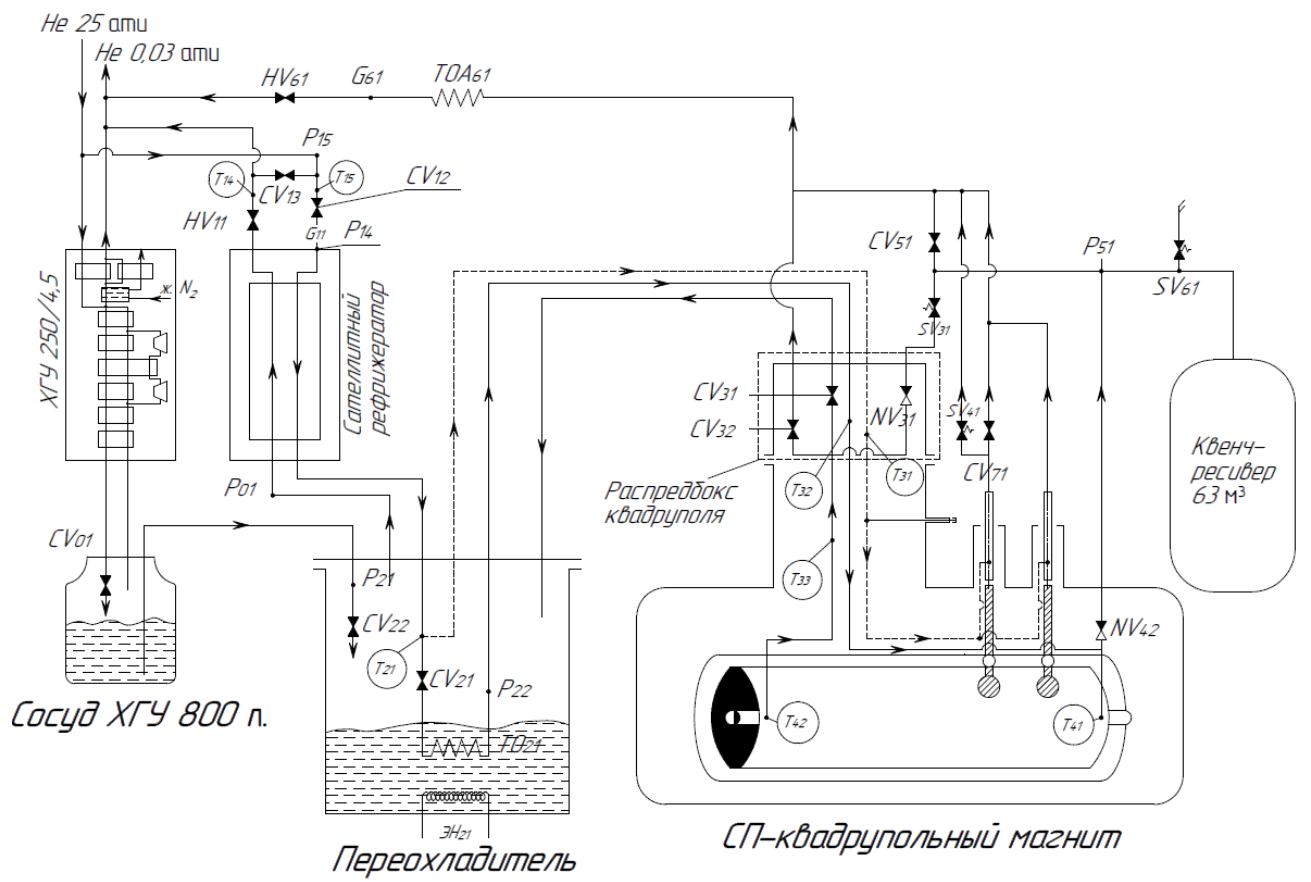


Рис. 2

Для связи с авторами:

Столяров Максим Николаевич

stolyarovmax@gmail.com

7(916)9317721

Козуб Сергей

kozub@ihep.ru

Агеев Анатолий

ageyev@ihep.ru

Орлов Александр

Alexander.Orlov@ihep.ru

Столяров Максим

stolyarovmax@gmail.com

7(916)9317721

Антонец Роман

antonets@ihep.ru

Власов Андрей

klodez@yandex.ru

~~Для переводчика:~~

~~Monitoring and control system of the test facility for studying Final Focusing System superconducting magnets~~

~~Аннотация:~~

~~NRC Kurchatov Institute IHEP has developed superconducting quadrupole magnets for the final focusing system of heavy ion beams of the HED@FAIR collaboration of the International Ion and Antiproton Accelerator Facility (FAIR) in Darmstadt, Germany. These quadrupoles should have the unique combination of a large superconducting coil inner diameter of 260 mm and a high magnetic field gradient of 37.5 T/m at a magnet operating temperature of 4.5K. To study these magnets in different operating modes, a test facility equipped with a monitoring and control system was developed. The system provides control and management of the temperature, and pressure in vessels and pipelines, value of isolation vacuum, the level and flow of liquid helium and nitrogen, 46 channels in total. All parameters of the test facility are recorded in the test archive and stored in ".xls" tables and ".tdms" files on the operator console.~~