

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА

УДК 681.5

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

© 2025 г. С. С. Козуб^а, *, А. И. Агеев^а, Р. В. Антонец^а, А. П. Орлов^а,
М. Н. Столяров^а, А. С. Власов^а

^а Институт физики высоких энергий им. А.А. Логонова
Национального исследовательского центра “Курчатовский институт”
Россия, 142281, Протвино, Московская обл., ул. Победы, 1

* e-mail: sergey.kozub@ihep.ru

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.

DOI: 10.7868/S3034564225070217

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 5.73 А, максимальное поле в сверхпроводящей обмотке 5.87 Тл, запасенная энергия 1.08 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 квадруполя равен 10 т. Гелиевый сосуд с холодной массой при помощи системы подвесок крепится к вакуумному сосуду, между стенками вакуумного сосуда и стенками гелие-

вого сосуда находится тепловой экран, охлаждаемый потоком гелия с температурой 50 К.

2. ОПИСАНИЕ СТЕНДА

Схема стенда для исследования сверхпроводящих квадрупольных магнитов представлена на рис. 2. Основу стенда составляют холодильная гелиевая установка (ХГУ) производительностью 150 л/ч, 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.

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;

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

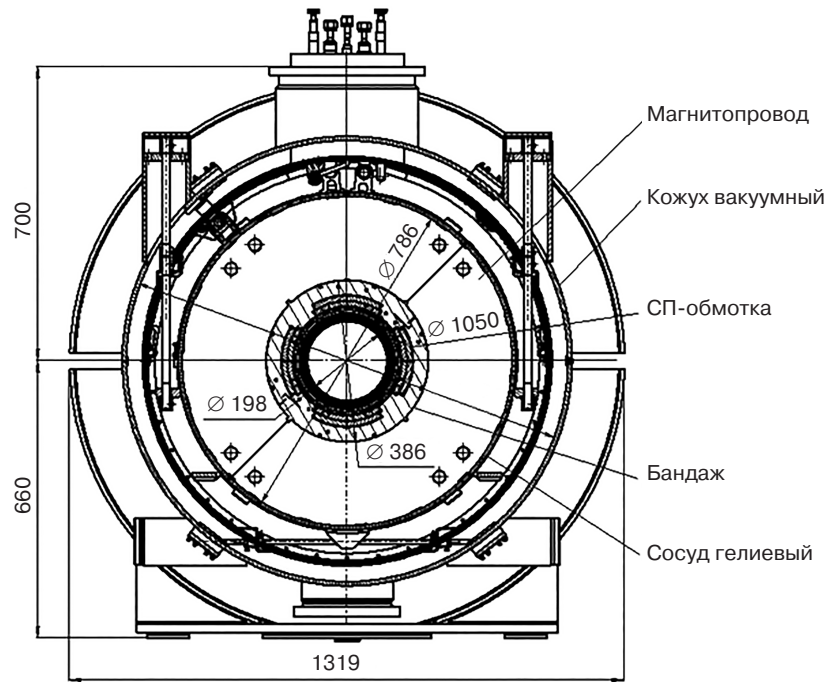


Рис. 1. Поперечное сечение квадруполя системы финальной фокусировки пучка ионов.

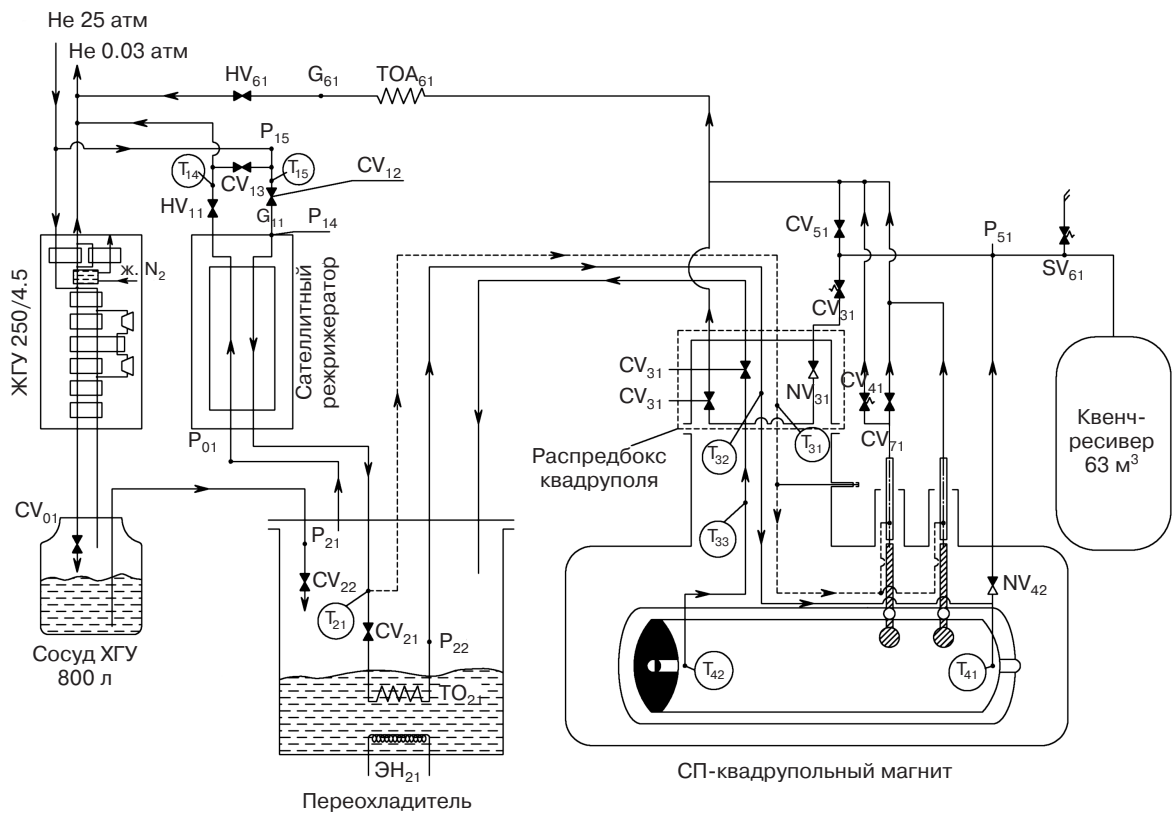


Рис. 2. Схема стенда для исследований сверхпроводящих квадруполей: *CV* – дистанционно управляемые вентили, *T* – термометры сопротивления, *P* – датчики давления, *G* – расходомеры, *SV* – предохранительные клапаны, *HV* – вентили с ручным управлением, *NV* – обратные клапаны, *ТО* – теплообменники.

- уровень жидкого гелия и уровень жидкого азота в переохладителе, всего два;
- 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 вентилях 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 MU_{110} , преобразователи интерфейсов AC_4 и блоки питания постоянного тока.

Управление электропозиционерами вентилях 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} -8А 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 TIC-3 и TIC-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 вентилей поступает от пульта оператора по отдельному каналу Ethernet через четырехканальные модули выхода NI 9265, установленными в шасси. Обратная связь с ЭВМ о текущем состоянии вентилей осуществляется через модули аналогового ввода сигналов NI 9219. В случае пропажи питания шасси сохраняет последнее заданное положение вентилей, 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 квадрупольных 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 про-

исходящих 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 вентилей WEKA и лабораторного источника питания EA-PS 2042-20В. 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 кана-

лов 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-WESBMH03>
2. Tkachenko L., Ageev A., Altukhov 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. Ageev A.I., Altukhov Ю.В., Богданов И.В., Каиштанов 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., Altukhov 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>