

## ПРИМЕНЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ

УДК 533.9.07+62-52

### ВСПОМОГАТЕЛЬНАЯ АВТОМАТИКА АТОМАРНОГО ИНЖЕКТОРА С ЭНЕРГИЕЙ 15 кэВ<sup>1</sup>

© 2025 г. В. В. Орешонок<sup>a, b, \*</sup>

<sup>a</sup> *Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера  
Сибирского отделения Российской академии наук  
Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11*

<sup>b</sup> *Новосибирский государственный университет  
Россия, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1*

\* *e-mail: V.V.Oreshonok@inp.nsk.su*

Поступила в редакцию 30.11.2023 г.

После доработки 24.04.2024 г.

Принята к публикации 25.04.2024 г.

Атомарный инжектор на положительных ионах (водород, дейтерий) сравнительно низкой энергии 15 кэВ, но с рекордным током пучка 150 А был разработан в ИЯФ для нагрева плазмы в открытых ловушках и компактных токамаках. К вспомогательным системам инжектора относятся: система регулировки давления в газовых трассах, вакуумная система и система заправки крионасосов. Алгоритмы автоматки реализованы при помощи разработанного программируемого логического контроллера с четырехканальным асинхронным интерфейсом связи. Уровень полевой шины представлен промышленными модулями удаленного ввода-вывода и приборами с физическими интерфейсами RS-232/485. Интерфейс пользователя обеспечен посредством меню дисплея передней панели логического контроллера, а также программного обеспечения, реализованного в среде LabVIEW.

DOI: 10.7868/S3034564225070107

#### 1. ВВЕДЕНИЕ

Экспериментальный образец атомарного инжектора на положительных ионах был спроектирован и изготовлен в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера (Новосибирск) [1]. Параметры инжектора представлены в табл. 1. Он функционирует в импульсном режиме и производит сфокусированные пучки атомов водорода и дейтерия с низкой энергией и большой величиной тока, что обеспечивает высокую мощность инъекции для нагрева плазмы.

Таблица 1. Параметры инжектора

Параметр	Значение
Энергия пучка	15 кэВ
Ток пучка	150 А
Длительность импульса	30 мс

Инжектор состоит из ионного источника с генератором плазмы и ионно-оптической системой и вакуумного объема, в котором располагаются нейтрализатор, крионасос, поворотный магнит, приемники ионов, а также подвижный калориметр. Подсистемы обеспечения инжектора включают систему высоковольтного питания 15 кВ и мощностью 2.2 МВт, источники питания сеток и плазменного генератора, систему подачи рабочего газа и ряд других подсистем. Система управления инжектором реализована на базе промышленного компьютера с встраиваемыми модулями ввода-вывода реального времени.

#### 2. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Вспомогательные подсистемы инжектора включают систему регулировки давления рабочего

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

газа, вакуумную систему, криосистему и водяную систему, которая не описана в данной статье.

Газовый коллектор состоит из монтажной панели на баке инжектора, а также импульсных клапанов плазменного генератора и нейтрализатора, управляемых в процессе инъекции. На газовой панели располагаются балластные объемы, клапаны регулировки давления, манометры и форвакуумный насос. Давление газа требуется регулировать независимо в отдельных каналах плазменного генератора и нейтрализатора с точностью  $\pm 10$  мбар.

Объем вакуумной камеры инжектора составляет около  $4 \text{ м}^3$ . Вакуумная система включает два инструментальных насоса для разных диапазонов откачки. Спиральный безмасляный насос Edwards XDS35 обеспечивает форвакуум с давлением менее  $10^{-1}$  Па, а турбомолекулярный насос Ebara EBТ1100 позволяет достичь высоковакуумных условий: давление составляет менее  $10^{-6}$  Па. Вакуумный пост также оборудован шиберами и клапанами для осуществления обслуживающих процедур и защиты оборудования и персонала. Мониторинг давления в вакуумной камере осуществляется вакуумметрами Thyracont VSP63/VSH88.

Дополнительную производительность, позволяющую улучшить вакуум до давления менее  $10^{-7}$  Па, обеспечивает крионасос, установленный в вакуумном объеме. Он имеет две криопанели и бак с жидким азотом емкостью 200 литров. Расход жидкого азота криосистемой инжектора составляет около одного бака в день. Это приводит к необходимости регулярной дозаправки, для чего система оснащена линией подачи жидкого азота с криоклапанами и монитором уровня криожидкостей Cryomagnetics LM-510. Для регистрации температуры азотной линии, а также температур криопанелей используется температурный монитор Lake Shore Model-218.

Требования, предъявляемые к автоматике вспомогательных систем инжектора, предусматривают наличие в ее составе программируемого логического контроллера (ПЛК) с интерфейсом оператора или реконфигурируемого интеллектуального модуля, обеспечивающего автономную работу в условиях отсутствия управляющего компьютера в процессе пусконаладочных работ и обслуживания. Система должна осуществлять управление автоматическими клапанами и шиберами, взаимодействовать с приборами, регистрировать давления, температуры, уровни,

реализовывать различные сценарии работы оборудования и гарантировать переход в безопасное состояние в случае возникновения аварийных ситуаций: неисправностей модулей, сбоев в работе установки и протечек в газовой, вакуумной или криосистеме. Для дополнительной защиты в алгоритме ПЛК должны быть предусмотрены настраиваемые сторожевые таймеры. Это позволит остановить текущий процесс на любом этапе при условии превышения отведенного на его выполнение времени. Интерфейс связи в составе ПЛК должен позволять обмен данными на расстояниях больших 50 м для взаимодействия с системой управления инжектором.

### 3. АППАРАТНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Система автоматизации построена с использованием распределенной архитектуры под управлением ПЛК. Оборудование системы располагается в зоне инжектора в небольшой 19-дюймовой стойке, а также на вакуумном баке, как показано на рис. 1. На уровне полевой шины использован физический интерфейс RS-485, причем каждая подсистема составляет независимый сегмент сети. Уровень представлен модулями удаленного ввода-вывода, а также

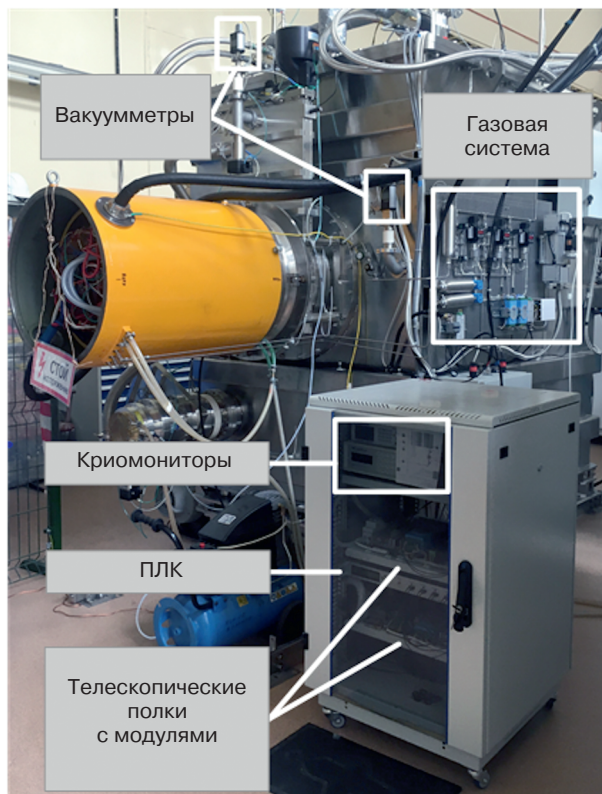


Рис. 1. Экспериментальная зона с инжектором.

измерительными приборами. В отдельных случаях использованы преобразователи последовательных интерфейсов.

В качестве ПЛК использован контроллер, который был разработан для решения задач автоматизации вспомогательных систем в предыдущих аналогичных проектах. Он представляет собой модуль в конструктиве 1U для 19-дюймовых стоек, оборудованный 32-битным микроконтроллером с архитектурой ARM Cortex-M4. Модуль имеет четыре независимых канала последовательной связи с заменяемыми платами физического интерфейса, что позволяет составить требуемую конфигурацию физических уровней для каждого из каналов, выбрав между RS-232/RS-485 или оптической линией. На передней панели ПЛК находится символьный дисплей и кнопки меню, что обеспечивает реализацию простого, но достаточного для оперативного персонала интерфейса взаимодействия. Интерфейс связи обеспечивается TCP-каналом 100 Мбит Ethernet Modbus. Контроллер подключается к управляющему компьютеру инжектора по оптической линии для гальванической изоляции.

Алгоритмы ПЛК разработаны с использованием среды LPCXpresso IDE (Free Edition) и загружаются в контроллер с помощью обычного USB-кабеля и драйвера виртуального COM-порта.

На рис. 2 представлена структура системы автоматизации. Архитектура и логика работы подсистем описана далее.



Рис. 2. Структура системы автоматизации.

### 3.1. Газовая система

Регулировка давления в каждом из трех каналов газового коллектора обеспечивается с помощью цифрового манометра, подключенного к балластному объему, и двух соленоидных клапанов: вводного и сбросного. Вводные клапаны каждого канала подключены к баллону с рабочим газом, в котором поддерживается избыточное давление. Клапаны сброса, в свою очередь, ведут к линии с форвакуумным насосом для откачки.

Управление соленоидными клапанами и регистрацию показаний манометров осуществляют модули удаленного ввода-вывода Advantech в составе:

- одного модуля с релейными выходами ADAM-4168;
- одного модуля аналогового ввода ADAM-4017.

Логика системы представляет собой простой ПИД-регулятор. Когда давление в балластном объеме превышает желаемую уставку, открывается клапан сброса соответствующего канала, и наоборот. Сторожевой таймер алгоритма предотвращает зависание системы в процессе регулирования. Система также обеспечивает возможность подготовительной откачки всего газового коллектора и позволяет проводить сервисное обслуживание с ручным управлением клапанами.

### 3.2 Вакуумная система

Вакуумная система включает в себя два шибера, один из которых находится между ионным источником и вакуумным баком, другой — на входе турбомолекулярного насоса, и четыре форвакуумных клапана с пневматическим приводом, управляемым соленоидным клапаном. Такая схема вакуумного поста позволяет разделять элементы инжектора для проведения различных процедур обслуживания, например регенерации крионасоса.

Форвакуумный насос XDS35 и турбомолекулярный насос EBT1100, оборудованный контроллером питания ETC1104, управляются с использованием портов удаленного управления.

Три вакуумметра VSP63/VSH88, подключенные к форвакуумной линии, ионному источнику и вакуумному баку инжектора, регистрируют показания давления. Они оборудованы выходами типа “сухой контакт” для индикации корректных вакуумных условий. Эти бинарные сигналы используются в качестве системных защит. Вакуумметры также имеют последовательный интерфейс для передачи показаний.

Часть сигналов защит также передается в систему управления инжектором: это защита по состоянию вакуума и защита по положению шибера ионного источника. Сигналы передаются по оптическим линиям.

Три модуля цифрового ввода-вывода Advantech ADAM-4055 задействованы для управления насосами, соленоидными клапанами (посредством промышленных реле) и мониторинга положений вакуумных шиберов и клапанов. Также они регистрируют состояние бинарных сигналов защит.

В системной логике реализованы алгоритмы для трех различных сценариев работы: независимой откачки ионного источника или вакуумного бака, откачки инжектора как единого целого. В соответствии с выбранным сценарием выполняется последовательность управления оборудованием: данные давлений, состояний насосов, положений вакуумных шиберов и клапанов анализируются конечным автоматом для формирования управляющего воздействия. Дополнительно реализован сторожевой таймер, позволяющий остановить процесс откачки на любом этапе на случай непредвиденных ситуаций в системе.

### 3.3. Криосистема

Заправка крионасоса жидким азотом осуществляется по подающему трубопроводу с установленными криоклапанами с пневматическим приводом, управляемым электрическими сигналами. В схеме используется вводной клапан, заливной клапан и выводной клапан, который в нормальном состоянии открыт в атмосферу и необходим для предзаправочного захлаживания трубопровода.

Уровень жидкого азота в баке крионасоса измеряется монитором LM-510 и передается системе автоматизации в аналоговом виде. Прибор также имеет выходы типа “сухой контакт” и генерирует бинарные сигналы, указывающие на выход значения уровня в баке за пределы, определяемые оператором.

Монитор Model-218 регистрирует показания температуры в азотном трубопроводе и посредством выхода “сухой контакт” сигнализирует о корректных температурных условиях. Два других канала монитора используются для измерения температур криопанелей насоса. Еще два канала задействованы в реализации механизма

терморегулируемого подогрева газосбросных выводов криосистемы, чтобы предотвратить их перекрытие замерзшей атмосферной влагой. Монитор оборудован последовательным интерфейсом для передачи измеренных температур.

Модули удаленного ввода-вывода Advantech используются для управления соленоидными клапанами через промышленные реле и контроля положения криоклапанов. Также они регистрируют бинарные сигналы защит и аналоговые показания. Всего задействованы три модуля:

- два модуля цифрового ввода-вывода ADAM-4055;
- один модуль аналогового ввода ADAM-4017.

Хотя аппаратная часть автоматики претерпела существенные изменения, основные принципы логики работы системы остались такими же, как описано в [2]. Конечный автомат получает информацию о температуре в азотопроводе, уровне жидкого азота в баке в виде бинарных сигналов защиты, положении криоклапанов и на основе этих данных формирует воздействие для управления процессом. На случай сбоев в работе измерительного оборудования, а также непредвиденных ситуаций в алгоритме управления реализован сторожевой таймер и предусмотрены тайм-ауты для различных этапов цикла заправки.

## 4. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Графический интерфейс пользователя вспомогательных систем, приведенный на рис. 3, разработан в среде проектирования LabVIEW

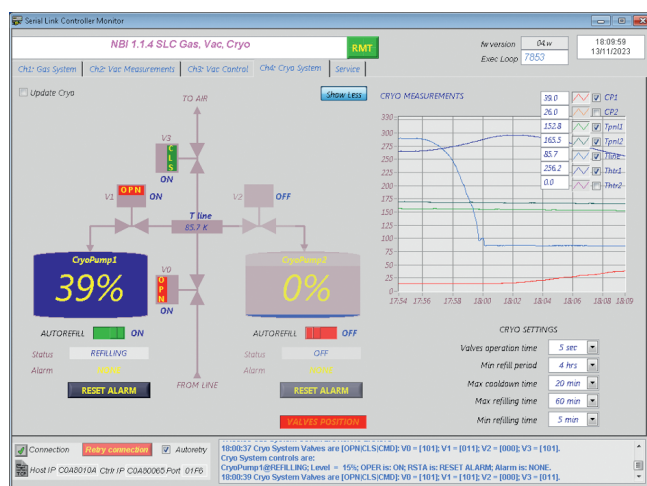


Рис. 3. Интерфейс пользователя.

и обеспечивает обмен информацией с ПЛК. Различные вкладки графического интерфейса относятся к разным каналам контроллера и содержат интерфейсы к разным подсистемам. Все интерфейсы построены по единому шаблону виртуального прибора, что позволяет унифицировать программное обеспечение для однотипных задач. Каждый виртуальный прибор предоставляет оператору индикацию состояния подсистемы, а также набор элементов управления и конфигурирования. Графический интерфейс также содержит журнал сообщений, в котором отображаются важные системные события и регистрируются изменения настроек. Информация из журнала сообщений, а также зарегистрированные показания сохраняются в лог-файлах.

Интерфейс пользователя вспомогательных систем инжектора может быть запущен как независимое приложение, когда это необходимо для нужд обслуживающего персонала. В других случаях он вызывается из программы управления инжектором, что обеспечивает интеграцию в общую систему управления и ее базу данных.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная система показала себя простым и эффективным решением для автоматизации распределенного вспомогательного оборудования в установках небольшого размера.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (FWGM-2022-0020).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дейчули П.П., Амиров В.Х., Ахметов Т.Д., Белов В.П., Бруль А.В., Вахрушев Р.В., Горбовский А.И., Давыденко В.И., Дейчули Н.П., Иванов А.А., Капитонов В.А., Колмогоров В.В., Ращенко В.В., Сорокин А.В., Ступишин Н.В. и др. // 50 Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному ИСРАФ-2023. Сборник тезисов докладов. М.: АО НТЦ "ПЛАЗМАИОФАН", 2023. С. 127.  
<https://doi.org/10.34854/ISRAF.2023.50.2023.1.1.083>
2. Драничников А.Н., Орешонок В.В. // ПТЭ. 2016. № 5. С. 150.  
<https://doi.org/10.7868/S0032816216040224>