

ПРИМЕНЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ  
ТЕХНИКИ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ

УДК 533.9.07+62-52

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

© 2024 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. Акад. 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.

## 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

<sup>1</sup> Материалы 28-й конференции по ускорителям заряженных частиц "RuPAC'23", Новосибирск

энергией и большой величиной тока, что обеспечивает высокую мощность инъекции для нагрева плазмы.

**Таблица 1.** Параметры инжектора

<b>Параметр</b>	<b>Значение</b>
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 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 м<sup>3</sup>. Вакуумная система включает два инструментальных насоса для разных диапазонов откачки. Спиральный безмасляный насос Edwards XDS35 обеспечивает форвакуум с давлением менее 10<sup>-1</sup> Па, а турбомолекулярный насос Ebara EBT1100 позволяет достичь высоковакуумных условий: давление составляет менее 10<sup>-6</sup> 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 измерительными приборами. В отдельных случаях использованы преобразователи последовательных интерфейсов.

**Рис. 1.** Экспериментальная зона с инжектором.

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 СОМ-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 использованы 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 таймауты для различных этапов цикла заправки.

#### 4. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

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

#### **Рис. 3.** Интерфейс пользователя.

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 ISPAF-2023. Сборник тезисов докладов. М.: АО НТЦ  
“ПЛАЗМАИОФАН”, 2023. С. 127.

<https://doi.org/10.34854/ISPAF.2023.50.2023.1.1.083>

2. Драничников А.Н., Орешонок В.В. // ПТЭ. 2016. № 5. С. 150.

<https://doi.org/10.7868/S0032816216040224>

## ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

**Рис. 1.** Экспериментальная зона с инжектором.

**Рис. 2.** Структура системы автоматизации.

**Рис. 3.** Интерфейс пользователя.



Рис. 1



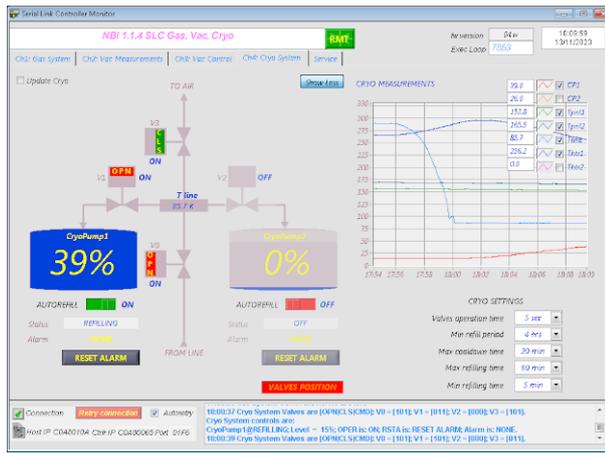


Рис. 3

**Для связи с авторами:**

Орешонок Владимир

E-mail: V.V.Oreshonok@inp.nsk.su

**Для переводчика:**

## **~~AUXILIARIES AUTOMATION FOR 15 KEV NEUTRAL BEAM INJECTOR~~**

**~~V. V. Oreshonok~~**

~~A positive ions (hydrogen, deuterium) neutral beam injector with low 15 keV energy, though having 150 A peak current, has been developed at BINP for the aims of plasma heating in open magnetic traps and compact tokamaks. The injector auxiliaries include: gas manifold pressure regulation system, vacuum system, cryopumps refilling system. The automation algorithms are provided by in-house designed programmable logic controller with four channel asynchronous interface. At the fieldbus level, there are industrial remote I/Os and instruments with RS-232/485 physical interfaces. A user interface is presented either by the programmable logic controller front panel display menu, or software interface, designed in LabVIEW.~~

~~2. Dranitchnikov A.N., Oreshonok V.V. // Instruments and Experimental Techniques. 2016. V. 59. № 5. P. 775.~~

~~<https://doi.org/10.1134/S0020441216040187>~~