

УДК 533.9.08; 681.787

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ДИСПЕРСИОННЫМ ИНТЕРФЕРОМЕТРОМ НА ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2

Ю.В. Коваленко, П.В. Зубарев, С.В. Иваненко, А.Л. Соломахин, Е.А. Пурыга, П.А. Багрянский

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

Данная работа описывает систему управления дисперсионным интерферометром на основе CO₂-лазера, разработанного и созданного в ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН (г. Новосибирск) для токамака Глобус-М2 (г. Санкт-Петербург, ФТИ им. А.Ф. Иоффе). Основой данной системы являются свободно программируемый контроллер ADAM-5510E/TCP с набором аналоговых и цифровых модулей ввода/вывода и специально разработанное программное обеспечение, позволяющее осуществлять контроль и управление работой и параметрами отдельных элементов интерферометра. За год работы дисперсионного интерферометра в качестве штатной диагностики токамака Глобус-М2 система управления показала хорошие уровни надёжности и помехоустойчивости.

Ключевые слова: дисперсионный интерферометр, Глобус-М2, система управления, LabVIEW, ADAM-5510/TCP.

CONTROL SYSTEM FOR DISPERSION INTERFEROMETER ON GLOBUS-M2 TOKAMAK

Yu. V. Kovalenko, P. V. Zubarev, S. V. Ivanenko, A. L. Solomakhin, E. A. Puriga, P. A. Bagryansky

Institute of Nuclear Physics G.I. Budker SB RAS, Novosibirsk, Russia

This paper describes the control system for a dispersion interferometer based on a CO₂ laser, developed by Budker Institute of Nuclear Physics (Russia, Novosibirsk) for the Globus-M2 tokamak (Russia, St. Petersburg, Ioffe Institute). The basis of this system is the programmable controller ADAM-5510E/TCP with a set of analog and digital input/output modules and specially developed software that allows monitoring and control of the operation and parameters of interferometer elements. During the year of the dispersion interferometer operation as a standard diagnostic at the Globus-M2 tokamak, the control system showed good levels of reliability and sustainability.

Key words: dispersion interferometer, Globus-M2, control system, LabVIEW, ADAM-5510/TCP.

DOI: 10.21517/0202-3822-2024-47-2-23-30

ВВЕДЕНИЕ

Для диагностики характера поведения плотности плазмы на токамаке Глобус-М2 (г. Санкт-Петербург, ФТИ им. А.Ф. Иоффе) в ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН был создан дисперсионный интерферометр (ДИ) на основе CO₂-лазера с искусственной фазовой модуляцией зондирующего излучения [1]. Основными преимуществами интерферометра такого типа по сравнению с традиционными схемами Майкельсона или Маха—Цандера [2] являются его компактность и слабая чувствительность к вибрациям оптических элементов [3—4]. Кроме этого, вследствие зондирования длинами волн ~5 и ~10 мкм ДИ существенно менее чувствителен к влиянию рефракции по сравнению с субмиллиметровыми интерферометрами [5, 6]. Для регистрации сигналов ДИ и вычисления плотности плазмы в режиме реального времени был разработан специальный измерительный модуль-фазометр [7]. Реализованные в его цифровом узле алгоритмы вычисления плотности плазмы основаны на гармоническом анализе сигналов интерферометра, что делает их устойчивыми к воздействию шумов и изменениям глубины модуляции.

Помимо задач по разработке оптической системы, аппаратуры регистрации и алгоритмов восстановления плотности плазмы, которые подробно описаны в [1, 7], важной частью работ являлось создание системы контроля и управления элементами ДИ и его режимами работы.

Дисперсионные интерферометры в настоящее время успешно работают на установках Глобус-М2 [1], ГДЛ (г. Новосибирск, Россия) [8], W-7X (г. Грейфсвальд, Германия) [9], LHD (г. Токио, Япония)

[10]. Ранее многоканальная система на основе ДИ была создана и эксплуатировалась на установке TEXTOR (г. Юлих, Германия) [11]. В данной статье делается акцент на аппаратуре, алгоритмах функционирования и специализированном программном обеспечении системы контроля и управления параметрами самого дисперсионного интерферометра установки Глобус-М2.

ДИ НА ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2

На рис. 1 показана функциональная схема ДИ для установки Глобус-М2 [1]¹. Источником зондирующего излучения является CO₂-лазер (AL50SG, Access Laser Company) с длиной волны 9,6 мкм. В удвоителе частоты 1 (на основе кристалла ZnGeP₂) это излучение частично преобразуется во вторую гармонику, после чего по одному и тому же пути распространяются уже два луча с длинами волн 9,6 и 4,8 мкм. Эти лучи фокусируются в эластооптический модулятор, в качестве которого используется модуль PEM-200 II/ZS50 производства Hinds Instruments, а после через вакуумное окно, изготовленное из просветлённого ZnSe, заводятся в плазму токамака Глобус-М2. Попадая в удвоитель частоты 2, излучение с длиной волны 9,6 мкм вновь преобразуется во вторую гармонику, а его оставшаяся часть поглощается фильтром. После этого два луча с длиной волны 4,8 мкм интерферируют и регистрируются фотодетектором PVI series фирмы VIGO System. Выходной электрический сигнал фотодетектора передаётся фазометру [2] для восстановления текущих значений интегральной плотности плазмы. Для обеспечения работы алгоритма восстановления интегральной плотности плазмы используется модуляция фазы интерферирующих лучей с помощью эластооптического модулятора (модулятор на рис. 1), работающего на частоте 50 кГц [1].

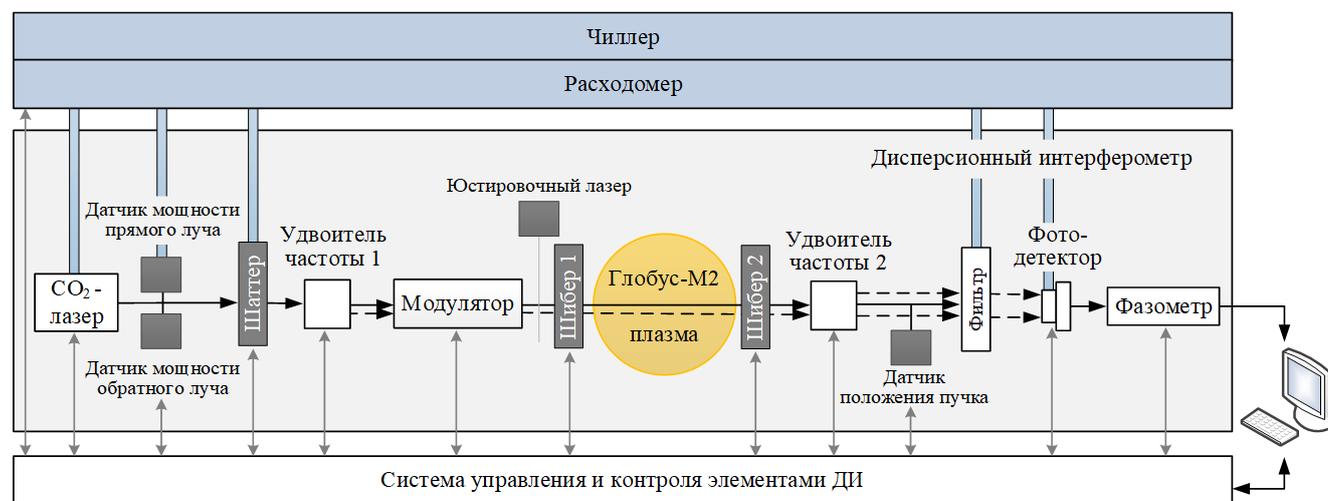


Рис. 1. Функциональная схема дисперсионного интерферометра на Глобус-М2

Для предотвращения непрограммируемого выхода излучения лазера с мощностью более 10 Вт за пределы герметичного бокса, где размещены основные элементы оптической системы, и его выхода в наружный оптический тракт используется управляемая механическая заслонка (шаттер на рис. 1) на основе поворотного зеркала N1031-1-B-P, U.S. Laser. Мощность лазера и качество юстировки оптического тракта контролируются тремя датчиками на основе фотодиодов DEXTER ST150 (датчик мощности прямого луча, датчик мощности обратного луча и датчик положения пучка на рис. 1). Для обеспечения процедуры юстировки оптических элементов в интерферометр встроен полупроводниковый лазер, излуча-

¹Показанная на рис. 1 схема является упрощённым вариантом схемы, приведённой в [1]. В реальности прошедшее через плазму излучение попадает на уголкового отражателя и выводится обратно через входное вакуумное окно, позволяя компактно расположить все оптические элементы интерферометра с одной стороны установки на одной оптической плите. Для обеспечения безопасной работы с излучением лазера, мощность непрерывного излучения которого превышает 10 Вт, оптическая система располагается в герметичном боксе.

ющий видимый красный свет (юстировочный лазер на рис. 1). Вакуумные окна установки оснащены вакуумными затворами (шиберами на рис. 1) с датчиками крайних положений.

Для охлаждения лазера и отдельных элементов интерферометра используется чиллер LAUDA VC 1200, обеспечивающий охлаждение системы до заданной температуры. Рабочая температура теплоносителя устанавливается в районе 20 °С. Величину потока воды контролирует расходомер IR-Opflow, Orbit Merret с диапазоном 0,3—9 л/мин. Типичное значение потока воды в системе охлаждения интерферометра составляет 8 л/мин.

Система управления и контроля отвечает за управление питанием всех перечисленных компонентов ДИ, регулирование и контроль параметров отдельных элементов, управление и контроль положения вакуумных затворов, защищающих окна на вакуумной камере установки, управление шаттером и контроль юстировки оптической системы.

АППАРАТУРА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДИ

Основой системы управления и контроля (рис. 2) является свободно программируемый модульный контроллер ADAM-5510/TCP производства Advantech [3] со следующим набором модулей:

- два трёхканальных измерителя температуры;
- два восьмиканальных АЦП;
- два восьмиканальных реле;
- шестнадцатиканальный выходной регистр;
- шестнадцатиканальный входной регистр.

Модули реле отвечают за управление включением питания элементов ДИ

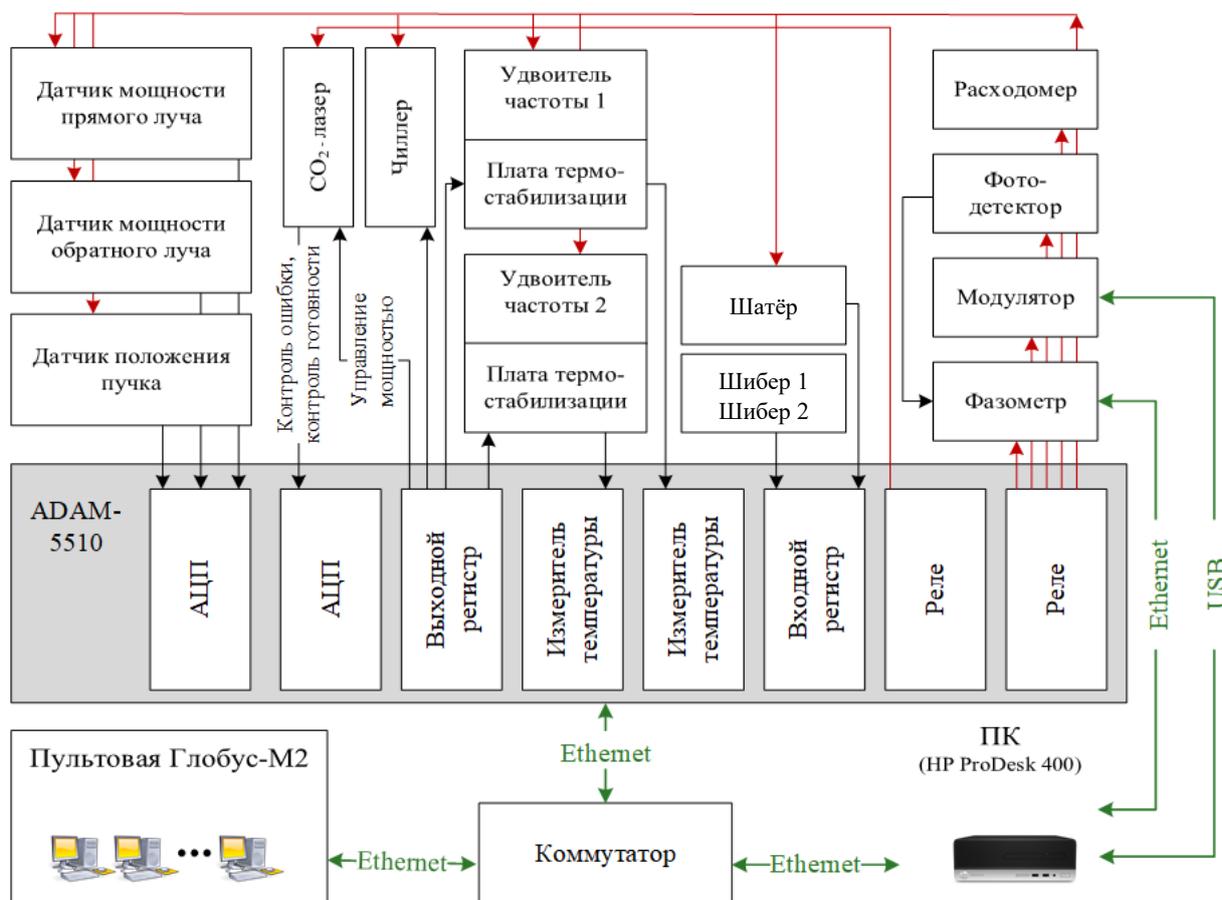


Рис. 2. Схема системы управления и контроля ДИ

Модули АЦП используются для контроля сигналов с блоков питания CO₂-лазера (сигнала ошибки и сигнала готовности лазера), а также для оцифровки сигналов с датчиков мощности и положения пучка.

Модули измерителей температуры используются для стабилизации температуры удвоителей частоты. Характеристики кристалла ZnGeP₂ температурно-зависимы, поэтому кристалл помещается в массивную медную оправу, оснащённую системой водяного охлаждения, нагревателями с сопротивлением около 20 Ом и термосопротивлением Pt100. На каждом удвоителе частоты располагается печатная плата размером 25×40 мм с разъёмом для кабеля управления, разъёмом для Pt100 и разъёмом для подключения нагревателя. На плате расположены электролитический конденсатор, полупроводниковый ключ питания нагревателя и светодиод индикации наличия тока в нагревателе. В измеритель температуры системы управления передаются значения сопротивления Pt100, напряжения питания нагревателя и сигнал управления ключом. В конкретный момент времени мощность нагревателя может принимать только два значения — максимальное и нулевое. Регулируется только усреднённая по интервалу 500 мс мощность. Регулировка осуществляется изменением длительности времени включения нагревателя на полную мощность в одном 500 мс цикле. Сигналы управления изменяют своё значение с дискретностью 5 мс, точность регулирования равна 1%.

На входной регистр подаются контролирующие сигналы с датчиков открытия/закрытия шаттера и шиберов, а также дополнительной заслонки на выходе из герметичного бокса с оптическими элементами интерферометра.

С выходного регистра подаются управляющие сигналы на платы термостабилизации и оптореле SKRD2420, включающие питание CO₂-лазера и чиллера.

ADAM-5510 через пятиканальный коммутатор связан по сети Ethernet с управляющим компьютером HP ProDesk400sff (ПК), на котором установлены управляющие программы и программы отображения и обработки данных. Через этот же коммутатор ПК имеет связь с компьютерами в пультовой установке Глобус-М2, с которых возможна работа на ПК по протоколам удалённого доступа. Фазометр подключён к ПК через выделенный сетевой адаптер и находится в выделенной сети, к которой имеют доступ только программы ПК. Управление эластооптическим модулятором осуществляется программами ПК через интерфейс USB.

КОНСТРУКЦИЯ АППАРАТНОЙ ЧАСТИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Вся аппаратура системы управления (за исключением монитора, клавиатуры и мышки) расположена на полках в пространстве под оптической плитой интерферометра вместе с блоками пита-



Рис. 3. Шкаф системы управления

ния лазера, блоками питания модулятора и фазометра. Контроллер ADAM-5510 расположен на DIN-рейке в монтажном шкафу 600×400×200 мм под оптической плитой (рис. 3). В этом же шкафу расположены все блоки питания с креплением на DIN-рейку, коммутатор Ethernet, оптические реле и коммутационная печатная плата с ответными разъёмами кабелей от приборов интерферометра и ответными разъёмами кабелей от модулей контроллера. На этой же плате реализована и схема преобразования частотного сигнала расходомера в напряжение, пропорциональное частоте.

Интерферометр расположен рядом с вакуумной камерой установки Глобус-М2 и попадает в зону импульсного магнитного поля, вследствие этого использование магнитных материалов в конструкции интерферометра ограничено. Оптическая плита изготовлена из углеродистой стали. Опорная конструкция, кожух, полки и монтажный шкаф выполнены из нержавеющей стали, щиты боковых стенок — из алюминия. Масса оптической плиты 71 кг, что составляет существенную часть массы всей конструкции, поэтому изменение магнитных свойств со временем остальных компонентов системы несущественно.

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Программное обеспечение (ПО) системы управления интерферометром можно разделить на три уровня (рис. 4):

- нижний: ПО микроконтроллера ADAM-5510;
- средний: ПО фазометра;
- верхний: управляющие программы на ПК.

Нижний уровень обеспечивает взаимодействие по сети Ethernet с аналоговыми и цифровыми модулями, подключёнными к контроллеру ADAM-5510.

Средний уровень отвечает за обмен данными с фазометром, а также за управление модулятором. Написан на языке «С» под ОС Linux Debian 7.0.

Верхний уровень состоит из двух независимых программ: основной программы управления интерферометром и программы управления фазометром и модулятором.

Основная программа реализована в среде LabVIEW. Она позволяет управлять включением/выключением питания всех узлов интерферометра, задавать коэффициенты термостабилизации для удвоителей частоты, а также отслеживать внештатные и аварийные ситуации. Предусмотрено два режима работы программы: ручной и автоматический. В руч-

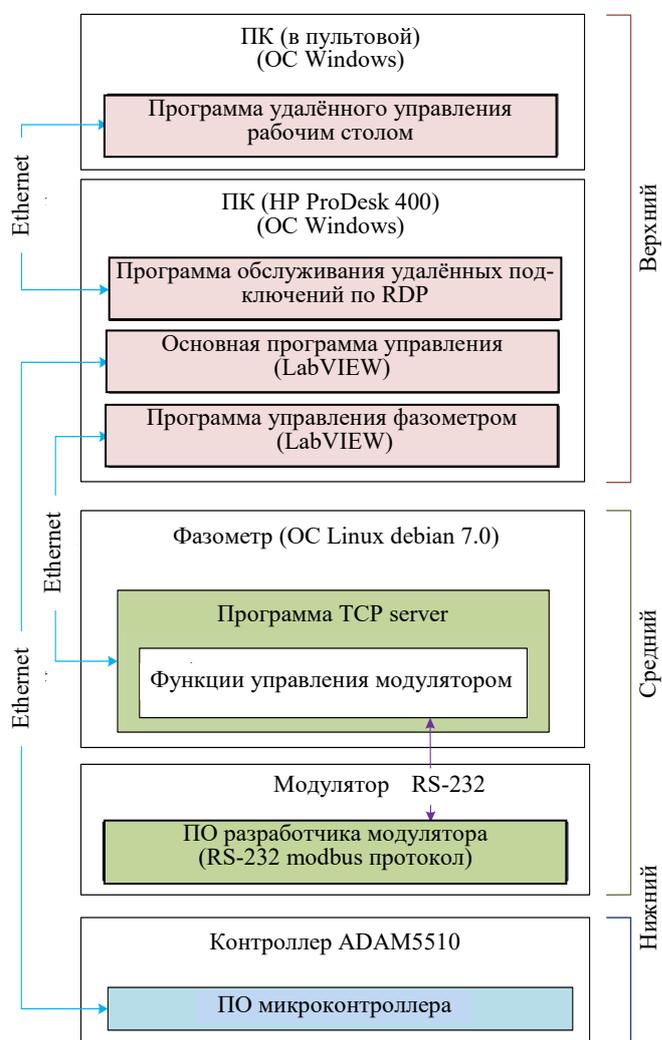


Рис. 4. Структура программного обеспечения системы управления интерферометром: нижний уровень обеспечивает взаимодействие по сети Ethernet с аналоговыми и цифровыми модулями, подключёнными к контроллеру ADAM-5510; средний уровень отвечает за обмен данными с фазометром, а также за управление модулятором, написан на языке «С» под ОС Linux Debian 7.0; верхний уровень состоит из двух независимых программ: основной программы управления интерферометром и программы управления фазометром и модулятором

ном режиме оператор через интерфейс программы воздействует на исполнительные устройства и контролирует состояния сенсоров. В автоматическом режиме оператору доступны пять операций (рис. 5):

- запустить/остановить программу;
- включить/выключить интерферометр;
- открыть шаттер на заданное время;
- изменить время открытия шаттера;
- изменить время блокировки шаттера до следующего открытия.

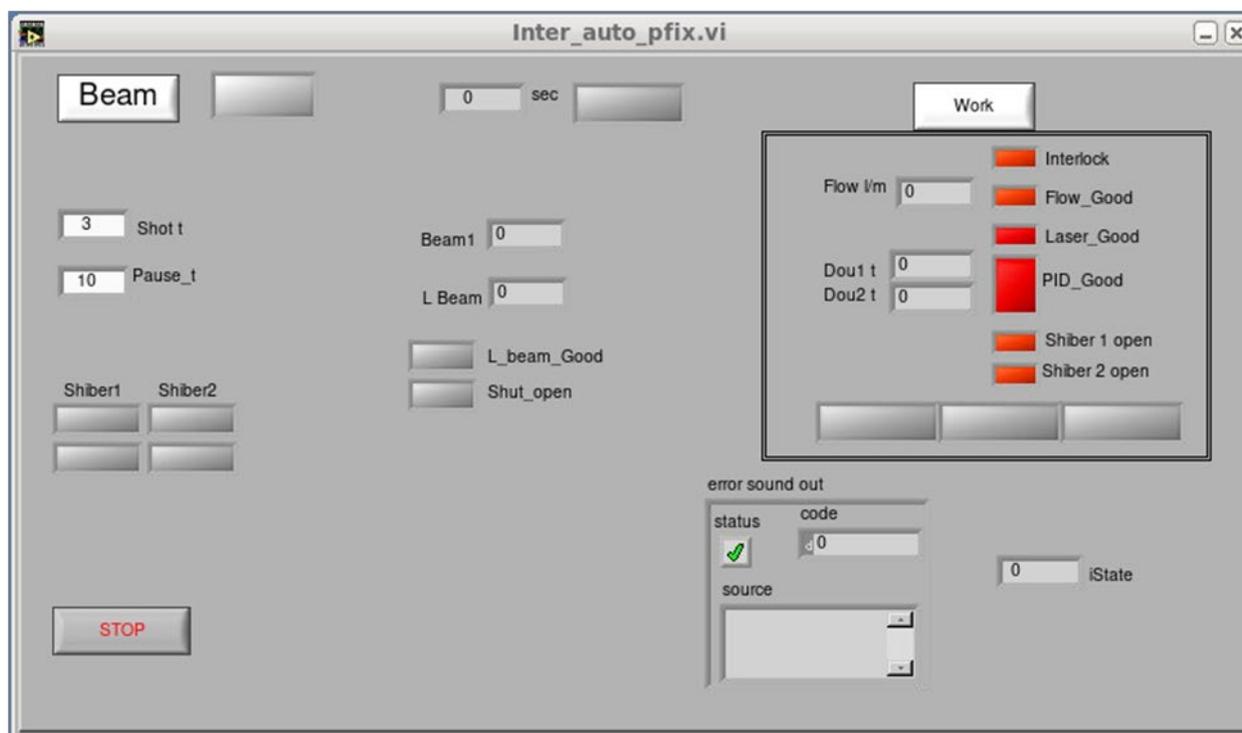


Рис. 5. Внешний вид консоли оператора основной программы управления ДИ для автоматического режима работы

Состояния важных элементов интерферометра отображаются либо зелёным, либо красным цветом, кнопка открытия шаттера срабатывает только при зелёном цвете индикаторов. Для работы интерферометра важны:

- открытые положения шиберов и закрытое для заслонки герметичного бокса;
- наличие потока воды выше порогового значения;
- нахождение температуры удвоителей частоты в заданных пределах;
- мощность лазера выше пороговой;
- отсутствие сигнала ошибки в блоках питания лазера.

Для информации выводятся положения шиберов и шаттера, температура термостабилизируемых элементов, текущая мощность лазера, оставшееся время открытого состояния шаттера и числовое значение номера состояния программного конечного автомата, реализующего алгоритм управления.

Характерное время смены управляющих сигналов модулей ADAM-5510 5 мс, для цифровых модулей оно ограничено быстродействием программы в контроллере, которая находится в непрерывном цикле с фиксированной длительностью 5 мс. Приборы интерферометра имеют характерное время изменения параметров в единицы и десятки секунд, но это не относится к фазометру, который выдаёт результат измерения плотности плазмы каждые 20 мкс. Стабилизируемые по температуре элементы выходят на режим за десятки секунд, CO₂-лазер выходит на номинальную мощность за несколько минут, чиллер обеспечивает стабильный поток воды за секунды, температура воды в системе охлаждения стабилизируется за несколько минут.

Программа управления фазометром и модулятором также реализована в среде LabVIEW. Модулятор подключён к фазометру по интерфейсу RS-232. Внешний вид консоли оператора показан на рис. 6.

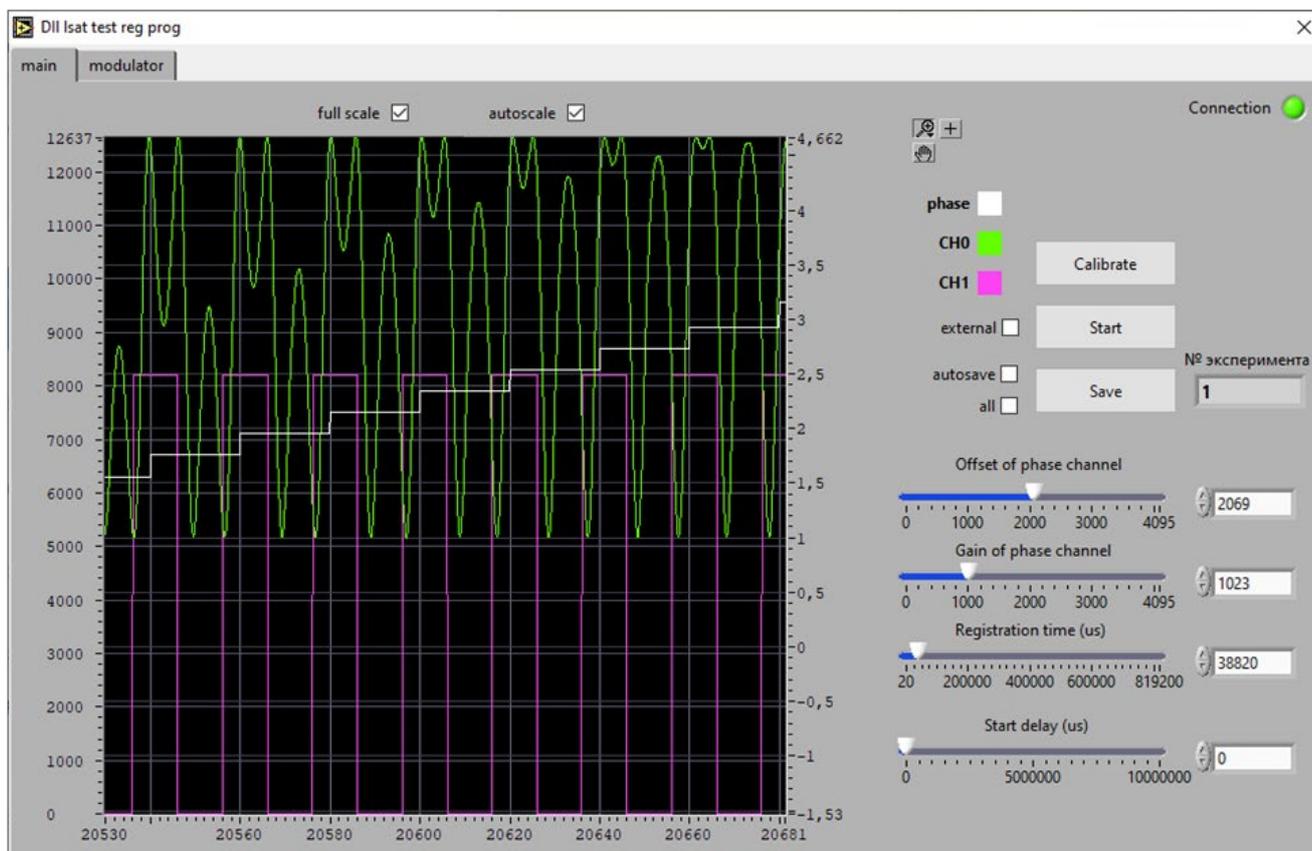


Рис. 6. Внешний вид консоли оператора программы управления фазометром

На рис. 6 зелёным показан тестовый сигнал фотоприёмника, оцифрованный с частотой 12,8 МГц, описываемый функцией вида $\sin(\sin\Omega t + \Delta\varphi)$, где $\Delta\varphi$ — набег фазы, пропорциональный интегральной плотности плазмы. На каждом периоде модулирующего сигнала (20 мкс) $\Delta\varphi$ изменяется на $\sim 0,2$ рад. Белым показан сигнал, соответствующий измеренному набегу фазы $\Delta\varphi$ (вычисляется один раз в 20 мкс). Фиолетовый сигнал соответствует частоте модулирующего сигнала (250 кГц), по нему определяются начало и конец периода вычисления набегу фазы $\Delta\varphi$. По горизонтальной шкале отложено время (в мкс), по вертикальной правой шкале определяется амплитуда сигнала фотоприёмника (в единицах младшего разряда 14-разрядного АЦП), по вертикальной левой — набег фазы (в радианах).

С левой стороны консоли оператора находятся управляющие кнопки и переключатели, обеспечивающие работу фазометра в разных режимах и позволяющие устанавливать необходимые константы.

Данная программа позволяет:

- задавать частоту модулятора;
- устанавливать режим работы фазометра: с внешним/программным запуском;
- задавать масштабирующие коэффициенты и значения сдвига «нуля» сигнала фотоприёмника или использовать автоматический расчёт этих параметров при помощи процедуры калибровки, которая подстраивает амплитуду входного сигнала под половину шкалы АЦП и привязывает «нулевую» линию к середине шкалы;

- задавать длительность цикла регистрации и время задержки внешнего запуска.

Данные о текущих измерениях значения набегу фазы и оцифрованные значения сигнала фотоприёмника выводятся на графической панели оператора и записываются в отдельный файл на ПК.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Созданная система управления является частью дисперсионного интерферометра на основе CO_2 -лазера для измерения абсолютных значений электронной плотности плазмы в токамаке Глобус-М2. Система

предназначена для осуществления контроля и управления работой и параметрами элементов ДИ. Она отвечает за управление питанием отдельных компонентов, контроль за юстировкой оптических элементов по данным трёх датчиков, организацию различных режимов работы, управление регистрацией и сбором данных, контроль за возникновением внештатных и аварийных ситуаций и пр. Основой системы являются свободно программируемый контроллер ADAM-5510E/TCP с набором аналоговых и цифровых модулей ввода/вывода и специально разработанное программное обеспечение, имеющее три уровня иерархии.

За год эксплуатации ДИ на установке Глобус-M2 система управления показала хорошие уровни надёжности, стабильности и помехоустойчивости.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 21-79-20201.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иваненко С.В., Соломахин А.Л., Жильцов Н.С., Зубарев П.В., Коваленко Ю.В., Курскиев Г.С., Солоха В.В., Ткаченко Е.Е., Шулятьев К.Д., Пурыга Е.А., Хильченко А.Д., Минаев В.Б., Багрянский П.А. Дисперсионный интерферометр для токамака Глобус-M2. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2023, т. 46, вып. 1, с. 86—94.
2. Калитеевский Н.И. Волновая оптика. — М.: Высшая школа, 1995.
3. Porf F.A., Tomita A., Al-Jumaily G. Second-harmonic interferometers. — Opt. Lett., 1980, vol. 5, p. 386.
4. Алум Х.П., Ковальчук Ю.В., Островская Г.В. — Письма в ЖТФ, 1981, vol. 7, p. 1359.
5. Кругляков Э.П. Методы оптической интерферометрии в системах с магнитным удержанием плазмы. Препринт. — Новосибирск: Ин-т ядер. физики СО АН СССР; 1986, с. 86—156)
6. Диагностика плазмы. Сборник статей. Вып. 3. — М.: Атомиздат, 1973. 102 с.
7. Иваненко С.В., Гринемайер К.А., Пурыга Е.А., Квашнин А.Н., Багрянский П.А. Измерительный модуль дисперсионного интерферометра на основе CO₂-лазера для управления плотностью плазмы. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2022, т. 45, вып. 1, с. 67—78.
8. Соломахин А.Л., Багрянский П.А., Воскобойников Р.В., Зубарев П.В., Квашнин А.Н., Лизунов А.А., Максимов В.В., Хильченко А.Д. Дисперсионный интерферометр на основе CO₂-лазера. — Приборы и техника эксперимента, 2005, № 5, с. 96—106.
9. Knauer J. et al. Power balance analysis of wendelstein. — In: 7-X Plasmas Using Profile Diagnostics 43rd EPS Conference on Plasma Physics, 2016, P4.017.
10. Akiyama T., Yasuhara R., Kawahata K., Nakayama K., Okajima S., Urabe K., Terashima K., Shirai N. Development of dispersion interferometer for magnetic confinement plasmas and high-pressure plasmas. — J. of Instrumentation, 2015, vol. 10, P09022.
11. Dreier H., Bagryansky P., Baumgarten N., Biel W., Lambertz H.T., Lehnen M., Lizunov A., Solomakhin A. First results from the modular multi-channel dispersion interferometer at the TEXTOR tokamak. — Review of Scientific Instruments, 2011, vol. 82, p. 063509.
12. https://advdownload.advantech.com/productfile/Downloadfile2/1-2EQ40H/ADAM-5510_Series_Manual_Ver4.2.pdf.



Юрий Васильевич Коваленко, с.н.с., к. техн. н.; ИЯФ СО РАН, 630090 Новосибирск, пр-т Академика Лаврентьева 11, Россия



Петр Васильевич Зубарев, н.с.; ИЯФ СО РАН, 630090 Новосибирск, пр-т Академика Лаврентьева 11, Россия



Светлана Владимировна Иваненко, с.н.с., к. техн. н.; 630090 Новосибирск, пр-т Академика Лаврентьева 11, Россия S.V.ivaneko@inp.nsk.su



Александр Леонидович Соломахин, с.н.с., к.ф.-м.н.; ИЯФ СО РАН, 630090 Новосибирск, пр-т Академика Лаврентьева 11, Россия



Екатерина Александровна Пурыга, с.н.с., к. техн. н.; ИЯФ СО РАН, 630090 Новосибирск, пр-т Академика Лаврентьева 11, Россия



Петр Андреевич Багрянский, заместитель директора по научной работе, д.ф.-м.н.; ИЯФ СО РАН, 630090 Новосибирск, пр-т Академика Лаврентьева 11, Россия

Статья поступила в редакцию 7 ноября 2023 г.

После доработки 5 апреля 2024 г.

Принята к публикации 10 апреля 2024 г.

Вопросы атомной науки и техники.

Сер. Термоядерный синтез, 2024, т. 47, вып. 2, с. 23—30.