

04.2

Система температурного контроля электромагнитной системы токамака Глобус-М2

© В.И. Варфоломеев¹, Е.Ю. Женишек¹, А.В. Лупин², В.Б. Минаев¹, Н.В. Сахаров¹, П.А. Бабарицкий³

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

³ Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: Vladimir.Minaev@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 30 мая 2022 г.

В окончательной редакции 21 июня 2022 г.

Принято к публикации 21 июня 2022 г.

Приведено описание системы температурного контроля, используемой для мониторинга теплового режима работы электромагнитной системы токамака Глобус-М2. Система представляет собой аппаратно-программный комплекс, построенный на платформе Arduino на основе микроконтроллеров семейства AVR. Разработанный графический интерфейс отражает в непрерывном режиме температуру в контролируемых точках и сигнализирует о ее выходе за пределы заданного диапазона. Предусмотрено автоматическое сохранение результатов измерений по контролируемым событиям.

Ключевые слова: токамак, электромагнитная система, температурный контроль.

DOI: 10.21883/PJTF.2022.15.53131.19264

Сферический токамак Глобус-М2 [1] был запущен в ФТИ им. А.Ф. Иоффе в 2018 г. Отличительной особенностью установки является увеличенный до 0.5 МА (в 2.5 раза по сравнению с токамаком Глобус-М [2]) ток в плазменном шнуре, удерживаемом в магнитном поле до 1 Т. Удерживающее магнитное поле создается с помощью токов, протекающих по обмоткам электромагнитной системы (ЭМС) токамака. С целью выявления аварийных ситуаций и предотвращения перегрева обмоток на них установлено большое число датчиков для оперативного контроля температуры. Для автоматизации процесса мониторинга и предупреждения об аварии была разработана цифровая система температурного контроля (СТК).

СТК представляет собой программно-аппаратный комплекс на базе простой и надежной платформы семейства отладочных плат Arduino на основе микроконтроллеров семейства AVR [3]. Плата может быть соединена с большим набором различных устройств, среди которых сенсоры (датчики температуры, влажности, давления, освещенности), исполнительные и приемопередающие устройства (Ethernet-, WiFi-, GSM-модули), устройства ввода-вывода. Модульность платформы дает гибкость, необходимую при решении широкого класса задач автоматизации. Наличие среды разработки и библиотеки программ позволяет в короткие сроки создать рабочий прототип устройства/системы и провести его испытания. Указанной библиотекой можно воспользоваться для работы с датчиками температуры DS18B20 фирмы DALLAS [4], которые получили широкое распространение благодаря низкой стоимости, простоте подключения, высокой точности, широкому температурному диапазону, выдаче цифрового кода температуры. Структура СТК представлена на рис. 1. В состав СТК

входят датчики температуры (ДТ) (до 60 штук при максимальной скорости передачи данных 115 200 Bd и топологии шины 1-Wire типа „дерево“), шина передачи данных 1-Wire, плата гальванической развязки, модуль управления (МУ) Arduino UNO R3 и персональный компьютер (ПК), подключенный к локальной сети токамака. Питание СТК осуществляется от одного порта USB ПК. Полученные данные сохраняются на сервере базы данных установки.

СТК выполняет следующие функции:

- управление режимами работы ДТ;
- измерение температуры в пошаговом цикле;
- анализ результатов измерений и сравнение с заданными пороговыми значениями;
- представление информации о температуре посредством графического интерфейса с возможностью сортировки по значению температуры или номеру датчика;
- управление режимами работы средствами графического интерфейса;
- запись данных измерений в файлы (три режима).

Для проверки работоспособности выбранных схемотехнических решений на базе интерфейса 1-Wire и отладки программного обеспечения микроконтроллера платы Arduino был использован отладочный стенд [5]. С помощью стенда были проверены работоспособность системы с подключенными длинным кабелем (30 м) ДТ в количестве более 40 штук, возможность применения топологии подключения ДТ типа „дерево“, работоспособность гальванической развязки на шине интерфейса 1-Wire, надежность передачи данных на максимально возможной скорости.

После этого были произведены монтаж сорока ДТ на токамаке и сборка СТК. Датчики DS18B20 имеют

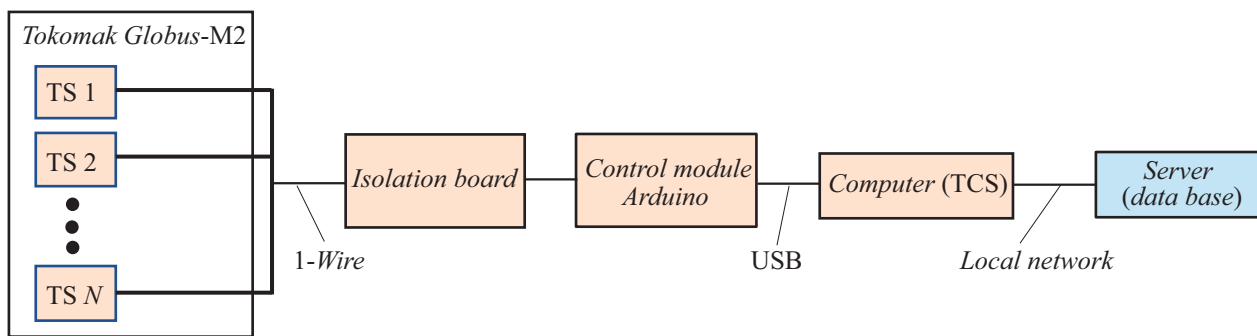


Рис. 1. Структура системы температурного контроля. TS_n — датчик температуры с порядковым номером n , *Isolation board* — плата гальванической развязки, *Control module Arduino* — модуль управления Arduino, *Computer (TCS)* — компьютер СТК, *Server (data base)* — файл-сервер базы данных, *1-Wire* — шина 1-Wire, *USB* — шина USB, *Local network* — локальная сеть Ethernet.

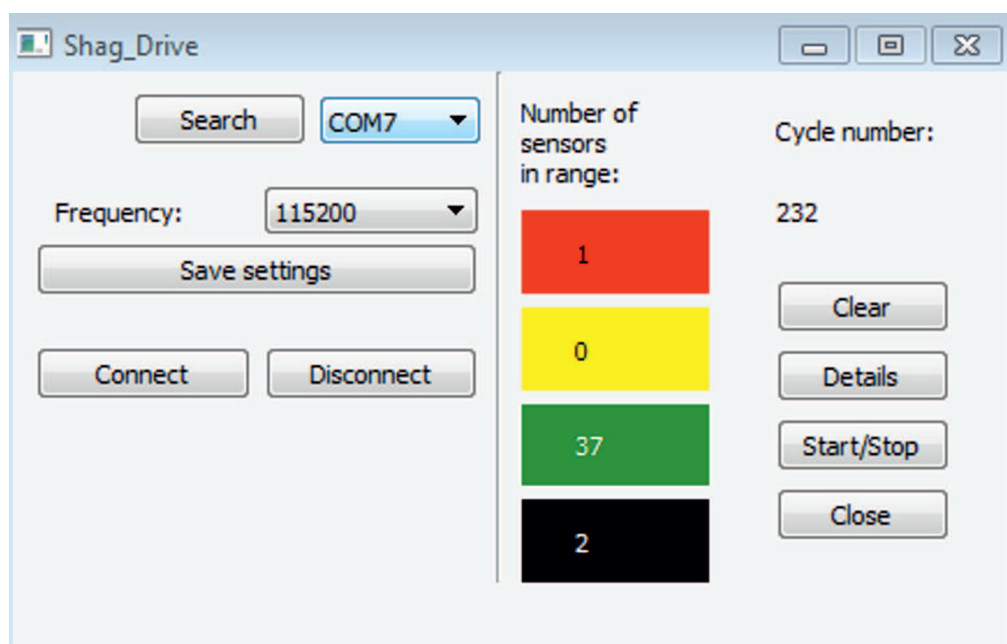


Рис. 2. Вид основного окна графического интерфейса.

диапазон измерения температуры от -55 до $+125^{\circ}\text{C}$, а погрешность измерений составляет 0.0625°C . В СТК производится округление температуры до целого значения, и максимальная абсолютная погрешность составляет $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$. Область измеряемых температур была разделена на три поддиапазона („норма“, „предупреждение“, „критический“), определяемых задаваемыми оператором для каждого ДТ пороговыми значениями: температура предупреждения (ТП) и температура критическая (ТК). Этим поддиапазнам отвечали соответственно зеленый, желтый и красный цвета в графическом интерфейсе.

Программное обеспечение СТК разрабатывалось на двух уровнях. Нижний уровень программного обеспечения реализован в среде IDE Arduino. Программа находится в flash-памяти МУ и реализует функции управления и чтения (сбора) данных от ДТ и передачи данных в ПК. Верхний уровень реализован в среде

Qt Creator 5.8.0 [6]. Программа выполняется на ПК и имеет следующие функции: проверка наличия ДТ, чтение данных из МУ, управление ресурсами СТК и визуализация данных посредством графического интерфейса пользователя, синхронизация событий, запись полученных данных.

На начальном этапе работы СТК требуется регистрация установленных ДТ путем создания (редактирования) для каждого датчика строки в файле реестра `filein.txt`. Для примера ниже представлена строка файла для шестого ДТ в формате уникальный заводской 64-разрядный идентификатор ДТ; порядковый номер ДТ; присвоенное имя (3–8 символов); ТП; ТК:

2874dfa2080000e0; 006; TF6-top; 40; 50

Работа СТК предполагает процедуру обнаружения датчиков в начале каждого запуска и сравнение полученного результата со списком зарегистрированных в

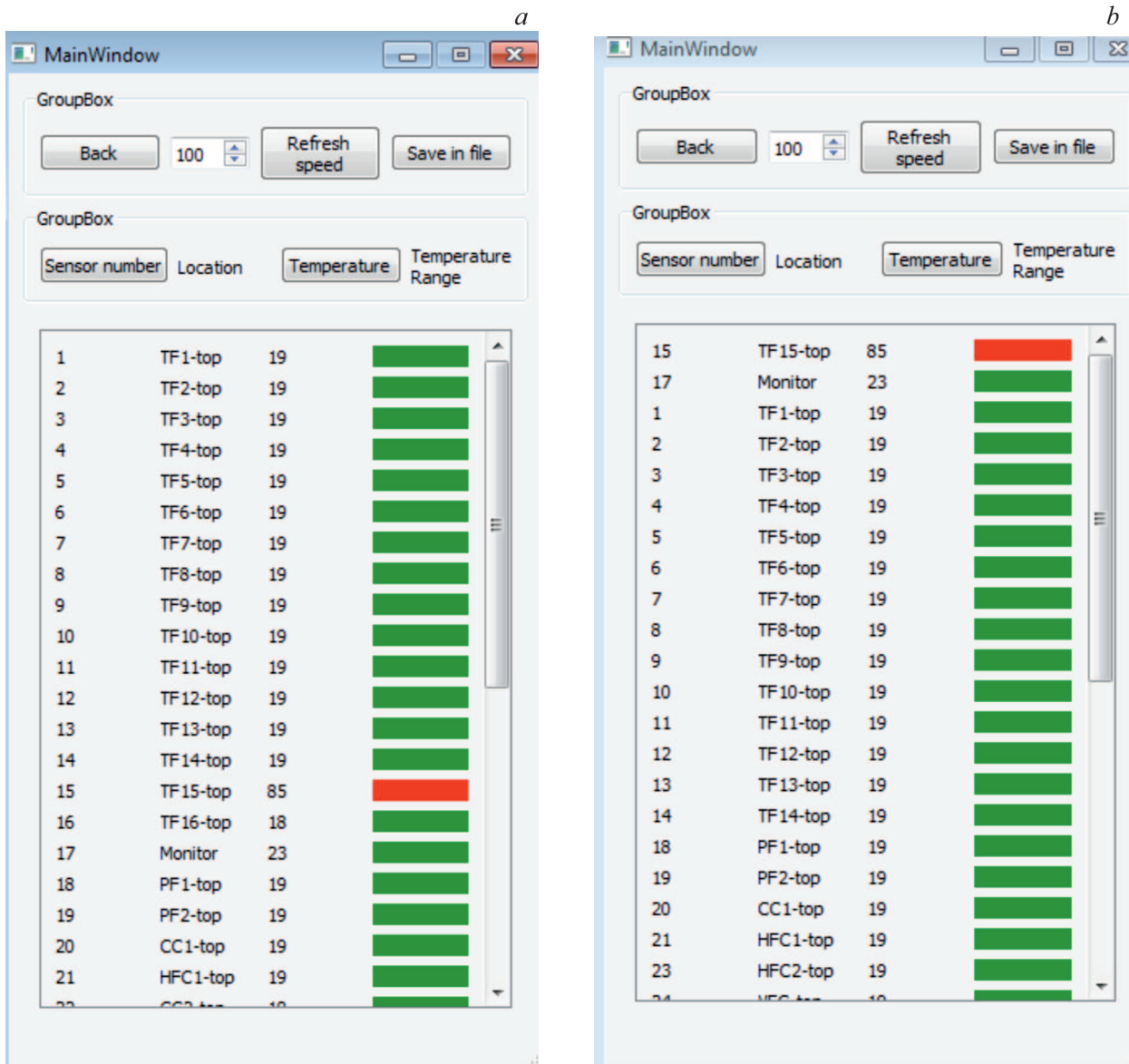


Рис. 3. Вид дополнительного окна графического интерфейса с информацией о всех ДТ: *a* — с сортировкой по порядковому номеру, *b* — с динамической сортировкой по значению температуры в сторону уменьшения.

реестре. Если какой-то из зарегистрированных датчиков не обнаружен (ДТ не работает или недоступен), то вместо идентификатора появится номер 0000000000000000. Если обнаруживается незарегистрированный датчик (новый ДТ), то в специальном файле `UnknownDevices.txt` появится запись с идентификатором нового датчика (16 символов).

Для работы с СТК был разработан графический интерфейс с окнами двух видов. С помощью основного окна (рис. 2) реализуются управление соединением компьютера с платой Arduino; управление работой ДТ, записанных в реестре; активация процесса измерений и контроль температурного режима в целом. Во втором окне (рис. 3) представлена информация о каждом ДТ в отдельности и предусмотрена возможность записи

данных в файл. Для каждого датчика выводятся его номер, записанное в реестре имя и текущее значение температуры. Цветом отображается соответствующий значению поддиапазон температуры: „норма“, „предупреждение“, „критический“ (цветные варианты рисунков представлены в электронной версии статьи). Можно задать сортировку по порядковому номеру или динамическую сортировку по температуре. Неисправные ДТ отображаются черным цветом.

Для СТК предусмотрен непрерывный режим работы (24/7) с циклическим опросом ДТ независимо от того, ведутся на токамаке какие-либо эксперименты или нет. Для работы СТК на ПК пульта управления токамаком должна быть запущена программа.

В СТК предусмотрена возможность сохранения данных в файл в трех режимах: ручном (по команде оператора), автоматическом мониторингом (при наступлении критического события), автоматическом измерительном (во время выстрела токамака). Все файлы имеют одинаковый формат, но разный размер и могут просматриваться с помощью стандартной программы, используемой для просмотра других файлов из экспериментальной базы данных установки. В первой строке файла указаны номера ДТ, в каждой следующей строке — значения температуры для каждого ДТ (положительные числа без знака). В ручном режиме оператор может записать в файл значения температуры в текущем цикле измерений СТК. В мониторинговом режиме СТК заполняет файл `critical.txt` при превышении ТК хотя бы на одном из датчиков. Третий режим предназначен для регистрации изменений температуры ЭМС, связанных с разрядом токамака. Длительность плазменного разряда в токамаке Глобус-М2 не превышает 1 s. В момент начала эксперимента (запуск системы синхронизации установки) в специальный файл на диске управляющего ПК токамака записывается уникальный номер текущего разряда, доступный для считывания другими устройствами и системами. Интервал между циклами измерений СТК составляет около 2 s, что, с одной стороны, значительно превышает характерное время остывания обмоток ЭМС, составляющее десятки секунд, а с другой — позволяет опросить все ДТ. В текущем буфере СТК хранятся данные за два последних цикла измерений. В конце каждого цикла производится считывание по локальной сети номера текущего разряда из специального файла управляющего ПК токамака. В том случае, если номер разряда изменился, в отдельной директории генерируется файл `tsxxxx.txt`, где `xxxx` — номер текущего разряда, в который записываются результаты двух циклов измерений температуры, предшествовавших моменту изменения номера текущего разряда, и еще 28 последующих циклов измерений. В общей сложности сохраняются данные о динамике изменения температуры в контрольных точках ЭМС в течение примерно 1 min. Таким образом, в базе данных сохраняется информация о температурном режиме работы ЭМС непосредственно перед разрядом и динамике остывания по его окончании.

СТК была испытана на токамаке Глобус-М2 в различных режимах работы установки. По окончании тестового режима эксплуатации система была оставлена в качестве штатного средства мониторинга температурного режима ЭМС установки.

Финансирование работы

Работа выполнена на уникальной научной установке „Сферический токамак Глобус-М“, входящей в состав Федерального центра коллективного пользования „Материаловедение и диагностика в передовых технологиях“, в ФТИ им. А.Ф. Иоффе в рамках государственного задания по проекту 0040-2019-0023.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] V.B. Minaev, V.K. Gusev, N.V. Sakharov, V.I. Varfolomeev, N.N. Bakharev, V.A. Belyakov, E.N. Bondarchuk, P.N. Brunkov, F.V. Chernyshev, V.I. Davydenko, V.V. Dyachenko, A.A. Kavin, S.A. Khitrov, N.A. Khromov, E.O. Kiselev, A.N. Kononov, V.A. Kornev, G.S. Kurskiev, A.N. Labusov, A.D. Melnik, A.B. Mineev, M.I. Mironov, I.V. Miroshnikov, M.I. Patrov, Yu.V. Petrov, V.A. Rozhansky, A.N. Saveliev, I.Yu. Senichenkov, P.B. Shchegolev, O.N. Shcherbinin, I.V. Shikhovtsev, A.D. Sladkomedova, V.V. Solokha, V.N. Tanchuk, A.Yu. Telnova, V.A. Tokarev, S.Yu. Tolstyakov, E.G. Zhilin, *Nucl. Fusion*, **57** (6), 066047 (2017). DOI: 10.1088/1741-4326/aa69e0
- [2] В.К. Гусев, В.Е. Голант, Е.З. Гусаков, В.В. Дьяченко, М.А. Ирзак, В.Б. Минаев, Е.Е. Мухин, А.Н. Новохацкий, К.А. Подушникова, Г.Т. Раздобарин, Н.В. Сахаров, Е.Н. Трегубова, В.С. Узлов, О.Н. Щербинин, В.А. Беляков, А.А. Кавин, Ю.А. Косцов, Е.Г. Кузьмин, В.Ф. Сойкин, Е.А. Кузнецов, В.А. Ягнов, *ЖТФ*, **69** (9), 58 (1999). [V.K. Gusev, V.E. Golant, E.Z. Gusakov, V.V. D'yachenko, M.A. Irzak, V.B. Minaev, E.E. Mukhin, A.N. Novokhatskii, K.A. Podushnikova, G.T. Razdobarin, N.V. Sakharov, E.N. Tregubova, V.S. Uzlov, O.N. Shcherbinin, V.A. Belyakov, A.A. Kavin, Yu.A. Kostsov, E.G. Kuz'min, V.F. Soikin, E.A. Kuznetsov, V.A. Yagnov, *Tech. Phys.*, **44** (9), 1054 (1999). DOI: 10.1134/1.1259469].
- [3] <https://www.arduino.cc/>
- [4] *Датчик температуры DS18B20* [Электронный ресурс]. URL: <https://arduinomaster.ru/datchiki-arduino/arduino-ds18b20/>
- [5] А.В. Лупин, П.А. Бабарицкий, в сб.: *X Междунар. конф. „Математическое моделирование в образовании, науке и производстве“* (Тирасполь, 2017), с. 121–123.
- [6] <https://www.filehorse.com/download-qt/29050/>