

P13-2025-44

Т. Б. Петухова, И. В. Папушкин

УПРАВЛЕНИЕ НАГРУЗОЧНОЙ МАШИНОЙ
НА ДИФРАКТОМЕТРЕ ФСД РЕАКТОРА ИБР-2
В ПРОГРАММНО-ИНСТРУМЕНТАЛЬНОМ
КОМПЛЕКСЕ Sonix+

Петухова Т. Б., Папушкин И. В.

P13-2025-44

Управление нагрузочной машиной на дифрактометре ФСД реактора ИБР-2 в программно-инструментальном комплексе Sonix+

Работа посвящена интеграции управления нагрузочной машиной LM-20 в программный комплекс Sonix+. Нагрузочная машина установлена на 11-м канале реактора ИБР-2 (нейтронный фурье-стресс-дифрактометр ФСД) для изучения образцов под внешней нагрузкой (± 20 кН) и при высоких температурах (до 800°C) в режиме *in situ* в нейтронном пучке.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики им. И. М. Франка ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2025

Petukhova T. B., Papushkin I. V.

P13-2025-44

The Loading Machine Control on the FSD Diffractometer of the IBR-2 Reactor in the Sonix+ Software Package

The work is devoted to the integration of loading machine LM-20 control into the Sonix+ Software Package. The loading machine is installed on channel 11 of the IBR-2 reactor (neutron Fourier stress diffractometer FSD) to study samples under external load (± 20 kN) and at high temperatures (up to 800°C) in the *in situ* mode in a neutron beam.

The investigation has been performed at the Frank Laboratory of Neutron Physics, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2025

Для проведения научных исследований по широкому спектру актуальных задач физического материаловедения на 11-м канале импульсного реактора ИБР-2 в ЛНФ ОИЯИ создан и много лет успешно функционирует нейтронный фурье-стресс-дифрактометр по времени пролета ФСД [1]. Одним из важных направлений научной программы на дифрактометре ФСД является изучение поведения новых перспективных материалов (композитов, градиентных материалов, различных сталей и сплавов, металлокерамик и т.д.) в режиме *in situ* в нейтронном пучке при различных внешних воздействиях (нагрузке, температуре) [2]. Обычно в подобных задачах исследуется взаимодействие нескольких фаз в одном материале и их совместное влияние на упругие свойства и остаточные напряжения. Подобные исследования важны для создания новых материалов с заранее заданными физико-химическими и механическими свойствами.

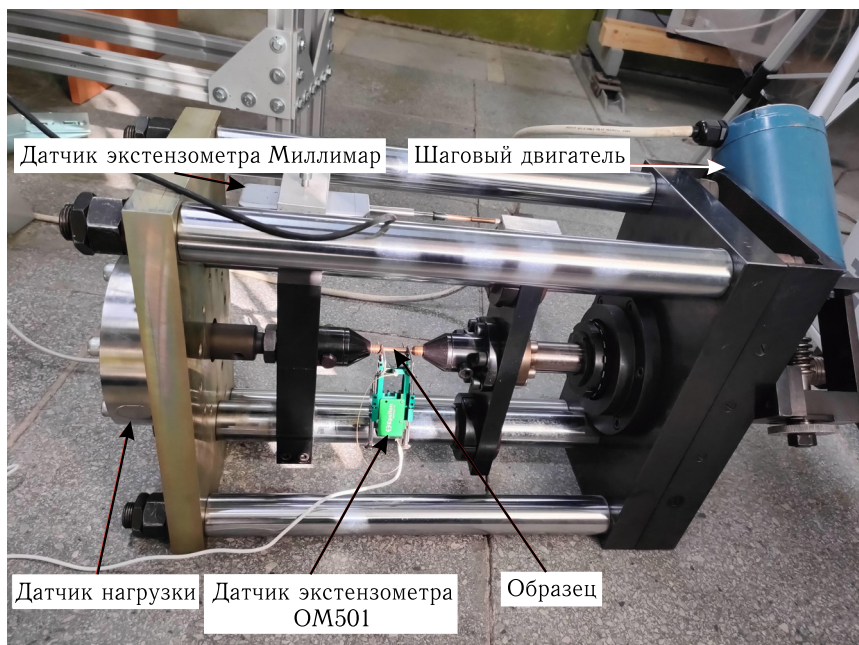


Рис. 1. Нагрузочная машина LM-20

Для проведения нейтронных экспериментов по данной тематике на дифрактометре ФСД используется нагрузочная машина механического типа LM-20 (рис. 1), которая позволяет подвергать образцы внешней одноосной нагрузке до ± 20 кН (растяжение/сжатие) при высоких температурах (до 800 °С). В состав оборудования нагрузочной машины LM-20 входят следующие компоненты:

- шаговый двигатель (далее ШД) для управления нагрузкой,
- датчик нагрузки,
- экстензометры для измерения деформации образца (OM501T — индикатор тензометров) — 4 шт.,
- экстензометр Миллимар С1245,
- терморегулятор Eurotherm-2408 с подключенным к нему силовым трансформатором с тиристорным управлением для задания температуры на образце.

С 2008 г. управление LM-20 осуществлялось с помощью отдельного компьютера с операционной системой Windows XP (32-bit) и установленного на него сервера базы данных Firebird [3] посредством специальной программы ReMeSys [4, 5] (Институт ядерной физики, г. Ржеж, Чехия). Данная система успешно работала до остановки реактора ИБР-2 в 2021 г. Рассмотрим основные принципы организации этой системы.

Описание системы ReMeSys

Система состоит из нескольких компонентов. Это устройства, регуляторы, группы данных и скрипты. Остальные части представляют собой базы данных, таблицы и графики, которые служат для хранения и отображения измеренных значений. Ее структурная схема представлена на рис. 2.

Устройства системы — это различные приборы, датчики, двигатели, управление которыми выполняется с помощью специальной программы (драйвер устройства). Регуляторы служат для функционального соединения двух и более устройств. Одно из них играет роль датчика, т. е. устройства с регулируемой переменной (например, положение, нагрузка). Другое устройство исполняет роль привода, который активно изменяет регулируемую величину (например, путем перемещения двигателя).

Группа данных — экспериментальные данные, сохраненные в базе данных. Эти данные затем доступны в виде таблицы с названием измерения для построения графиков.

Список устройств, регуляторов и групп данных отображается на левой панели главного интерфейсного окна (см. рис. 3, поле 1). Там же в центре окна расположено поле графиков (поле 2), а на правой панели — таблицы выбора графиков и их настройки (поля 3 и 4).

Управление устройствами, регулятором и группами данных выполняется с помощью скрипта (рис. 4) с функциональностью, эквивалентной ручному управлению. В качестве языка программирования скриптов используется Object Pascal, для которого написано расширение для работы с устройствами нагрузочной машины. Команды скрипта позволяют переме-

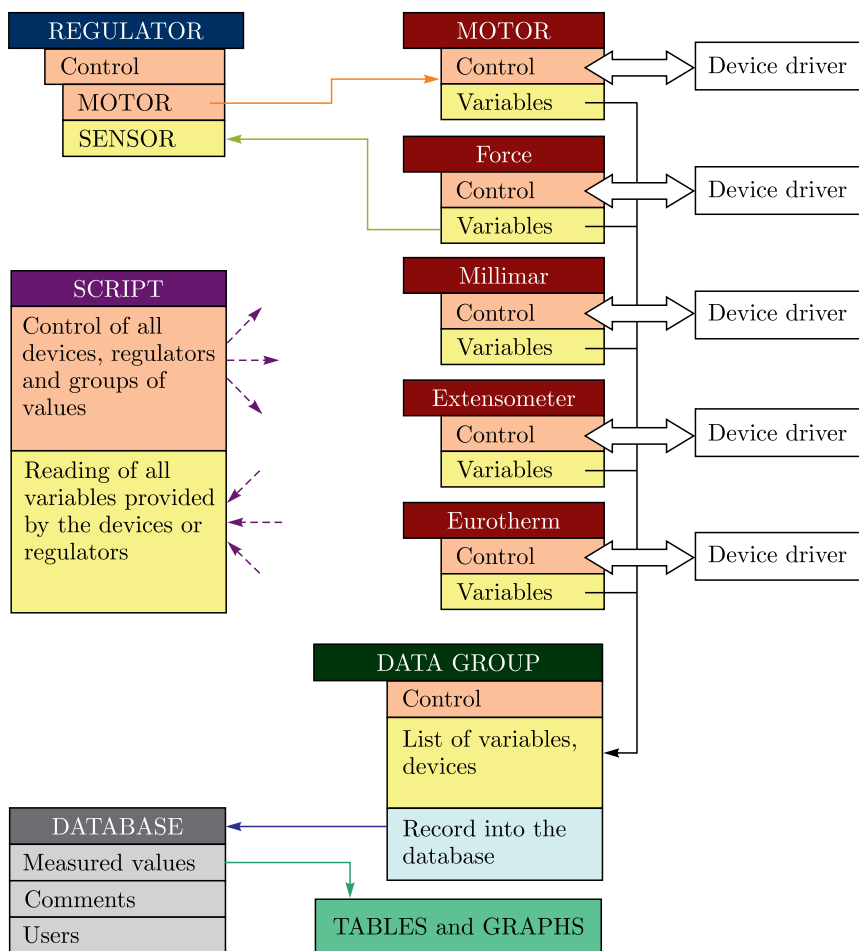


Рис. 2. Структурная схема системы ReMeSys

щать двигатель, считывать показания с датчиков, запускать и останавливать измерения, записывать измеренные данные в базу данных.

Таким образом, нагрузочная машина — это сложная система устройств, с помощью которой создаются определенные условия на исследуемом образце. В связи с отсутствием возможности внешнего управления системой ReMeSys синхронизация системы с программно-инструментальным комплексом Sonix+ [6], который был разработан в ЛНФ ОИЯИ и используется на спектрометрах реактора ИБР-2, реализована с помощью протокола FTP.

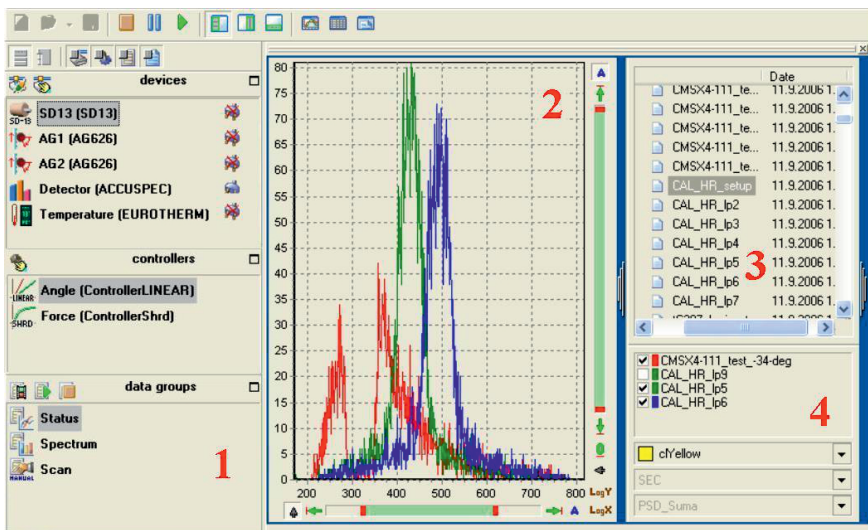


Рис. 3. Главное окно системы ReMeSys

Интеграция нагрузочной машины в программный комплекс Sonix+

В период остановки реактора ИБР-2 в связи с заменой компьютера, подключенного к нагрузочной машине, и отсутствием поддержки со стороны разработчиков ReMeSys возникла необходимость в разработке нового программного обеспечения с функциональностью, эквивалентной возможностям ReMeSys. Оно должно осуществлять:

- ручной и автоматический режимы управления ШД, обеспечивающие
 - выход на заданную нагрузку с остановкой ШД;
 - выход на заданную нагрузку и поддержание ее (ШД продолжает работать);
 - перемещение ШД на заданное количество шагов в одну или другую сторону;
- ручной и автоматический режимы управления температурным контроллером;
- запись данных с датчиков в формате ASCII с возможностью изменения частоты опроса датчиков в процессе эксперимента;
- визуализацию экспериментальных данных.

Реализация

Комплекс Sonix+ имеет иерархическую модульную структуру. Это позволило сравнительно легко подключить к нему оборудование нагрузочной машины. В частности, для новых контроллеров (датчики и терморегулятор) были разработаны соответствующие модули нижнего уровня, а на основе

```

1 program ForceFe;
2 var
3   FileName, DateTimeStamp, CurDate, MeasureName, SPress, SPause : string;
4   P, Pminute : integer;
5   Hour, Min, Sec, MSec: Word;
6   CurForce : double;
7
8 begin
9   while FileExists('e:\load.txt') = true do // ожидание файла с параметрами измерения
10  begin
11    // чтение информации об эксперименте
12    FileOpen('e:\load.txt');
13    FileName := FileReadLn('e:\load.txt'); // чтение имени измерения из файла load.txt
14    SPress := FileReadLn('e:\load.txt'); // чтение нагрузки
15    SPause := FileReadLn('e:\load.txt'); // чтение времени удержания нагрузки
16    FileClose('e:\load.txt');
17
18    P := StrToInt(SPause);
19    Pminute := P/60000;
20
21    CurForce := StrToFloat(SPress); // задать нагрузку
22
23    MeasureName := FileName;
24    test.StartMeasure(MeasureName,1); // старт записи протокола эксперимента
25
26    Force.Tolerance := 0.05; // погрешность нагрузки
27
28    Force.MoveA(CurForce, true); // выход на заданную нагрузку
29 //запуск нейтронного эксперимента
30 FileRewrite('e:\runswEEP.txt');
31 FileWriteLn('e:\runswEEP.txt',FileName); // запись имени измерения в файл
32 // запись текущей нагрузки:
33 FileWriteLn('e:\runswEEP.txt',floattostr(Round(cela.Position*100)/100));
34 FileClose('e:\runswEEP.txt');
35 pause(P); // удержание нагрузки в течение нейтронного измерения
36
37 test.StopMeasure; // конец записи протокола эксперимента
38 end;
39
40 Force.Stop; // конец эксперимента
41 end.

```

Рис. 4. Пример рабочего скрипта ReMeSys

модуля управления моторами был создан модуль управления ШД нагрузочной машины — в него были добавлены команды перемещения двигателя, связанные с управлением нагрузкой. Для сбора данных с датчиков и их протоколирования был разработан сервер записи протокола — *prot_writer*, а для визуализации протоколов измерений — программа *Graph Viewer*.

Интерфейс пользователя

На дифрактометре ФСД, как и на большинстве спектрометров реактора ИБР-2, управление измерением ведется с помощью универсального графического интерфейса *Sonix_GUI*, реализующего все необходимые основные функции, а именно

- слежение за состоянием установки,
- управление процессом измерения,
- слежение за историей измерения,
- online- и offline-визуализацию спектров.

Автоматическое управление нагрузочной машиной. В комплексе Sonix+ пользователь может управлять устройствами как в ручном режиме, так и в автоматическом через программу эксперимента (скрипт). На практике автоматический режим является основным. Существенную

Таблица 1

Команда	Описание
m_goto_by_sensor (motor, sensor_value, hold_flag)	Выход мотора «motor» на заданную нагрузку: <ul style="list-style-type: none"> • sensor_value — величина нагрузки, кН • hold_flag — удерживать/не удерживать нагрузку (True/False)
m_stop(motor)	Остановить мотор «motor»
PW_set_prot_params (prot_name,out_period)	Задать параметры протокола эксперимента: <ul style="list-style-type: none"> • prot_name — имя файла протокола • out_period — период записи в протокол
PW_set_prot_period (new_out_period)	Изменить период записи в протокол: <ul style="list-style-type: none"> • new_out_period — период записи в протокол
PW_start()	Старт записи в протокол эксперимента
PW_stop()	Завершить запись в протокол эксперимента

```

testcontrol_LM_script.py
1  # -*- coding: utf-8 -*-#
2
3  from library.fsd_lib import *
4  from library.fsd_users_lib import *
5
6
7  LM_prot_name = "e:/fsd/LM/LM_prot_test.txt" # имя файла протокола
8  out_period = 0.5 # период записи в протокол, sec
9  new_out_period = 60 # период записи в протокол (новый), sec
10 euro_tdelta = 2 # погрешность температуры
11 TargetTemp = 50.0 # величина температуры
12 CurForce = 26.5 # величина нагрузки
13 hold_flag = True # флаг удержания нагрузки
14
15 SweepParams = [1000,2,10,1,1] #[Vmax,swtime,steps,start_number_of_sweep,number_sweep]
16 FileMsk = 'test'
17 FileNumber = 4
18 Comm = 'test'
19
20 Initialize('User', 'LM_test', 'Load_Machine_test')
21 Euro_set_Error(euro_tdelta) # задать погрешность температуры
22
23 # задать параметры протокола эксперимента:
24 PW_set_prot_params(LM_prot_name,out_period)
25 PW_start() # старт записи протокола эксперимента
26 Euro_start_wait('test', TargetTemp) # выход на заданную температуру
27
28 # выход на заданную нагрузку с последующим ее удержанием:
29 m_goto_by_sensor(LM20_motor, CurForce, hold_flag)
30 PW_set_prot_period(new_out_period) # изменить период записи в протокол
31
32 RunMeas('CompositeVarSym', SweepParams[0], SweepParams[1],
33 SweepParams[2], SweepParams[3], SweepParams[4], FileMsk, FileNumber, Comm, 2.75)
34
35 Dirichlet(1000,240,'tp0',1,5,0) # запуск основного дифракционного измерения
36 m_stop(LM20_motor) # остановить ИД, измерение закончено
37
38 PW_stop() # завершить запись протокола эксперимента
39 EndOfExperiment()

```

Рис. 5. Пример программы эксперимента с нагрузочной машиной в Sonix+

Force control and measurement system for Soms

LM20_motor

position: 200.0 steps
Work_Motor_Speed: 70

Extens

Used sensor: S1 Select PhysO_Sekt

Current_Value: 5.26 mm

Force

Current_Value: 26.815 kN
Target_Value: 26.500 kN

Millimar

Current_Value: 0.0 mm

euro_2408

CurTemp: 28.0 °C
SetPoint: 30.0 °C
OutputLevel: 1.1 %

prot_writer

out_period: 1.0 sec
prot_filename: <unsigned>

Working directory

- EntireLM
 - LM_protocol_test
 - LM_prot_test
 - LM_prot_test1
 - Extens
 - Force
 - Millimar
 - Motor_steps
 - CurTemp
 - OutPower
 - LM_prot_test2
 - Extens
 - Force
 - Millimar
 - Motor_steps
 - CurTemp
 - OutPower

4

2

Axis list:

Axis Name	Position	Sensor	Speed
LM20_motor	200.0 steps	26.8150	70

goto_by_sensor: 26.5 holding OK Stop

goto_by_sensor OK => LM_motor: sensor=26.815, pos=200.0

3

Euro_2408 Control

Mode: Auto 00:37

Condition: Test_Wait: Stop

Current Temp: 30.0 Output Power: 1.1 Set

Final Temp: 28.0 Temp Error: 4.0 Set

Termostat has been started (with waiting). Final Temp = 30.0

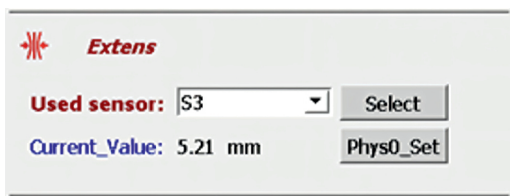
Рис. 6. Общий вид интерфейса LM_GUI

часть скрипта представляют вызовы так называемых операций библиотеки. Эта библиотека уникальна для каждой установки, так как составляется согласно принятой в ней методике измерений. Каждая операция оформлена по определенным правилам Sonix+ в виде процедуры на языке Python. В табл. 1 приведен набор команд для управления узлами нагрузочной машины, которые были добавлены в библиотеку дифрактометра, а на рис. 5 — пример программы эксперимента с нагрузочной машиной.

Ручное управление нагрузочной машиной. Для этого и наблюдения за состоянием ее устройств был разработан специализированный интерфейс — LM_GUI (рис. 6), вызов которого выполняется из панели быстрого запуска Sonix_GUI. Условно окно интерфейса можно разделить на четыре части:

- индикатор состояния устройств нагрузочной машины (1),
- ручное управление ШД (2),
- ручное управление терморегулятором (3),
- визуализация протоколов эксперимента — программа *GraphViewer* (4).

Индикатор состояния устройств нагрузочной машины. Это набор однотипных виджетов, где отображаются имя устройства, значок этого устройства и значения параметров, представляющих наиболее значимый интерес для пользователя. Нагрузочная машина имеет четыре экстензометра, предназначенных для разных условий эксперимента, каждый со своими параметрами, причем в каждом конкретном измерении используется только один. Все они прописаны в конфигурационном файле Sonix+. В виджете состояния этого устройства предусмотрена возможность выбора экстензометра для конкретного измерения — выпадающий список с кнопкой *Select*:



Ручное управление ШД. Для ШД реализованы перемещение на заданное количество шагов на относительное и абсолютное значение в заданном направлении, выход на заданную нагрузку с остановкой ШД и выход на заданную нагрузку и поддержание ее (ШД продолжает работать). Структурная схема выхода ШД на заданную нагрузку приведена на рис. 7.

Значение текущей нагрузки (F) определяется с помощью датчика нагрузки, опросом которого занимается отдельная задача. SetF, значение заданной нагрузки, и флаг удержания нагрузки (holding_flag) указываются пользователем перед началом измерения как параметры команды goto_by_sensor. Остальные параметры такие:

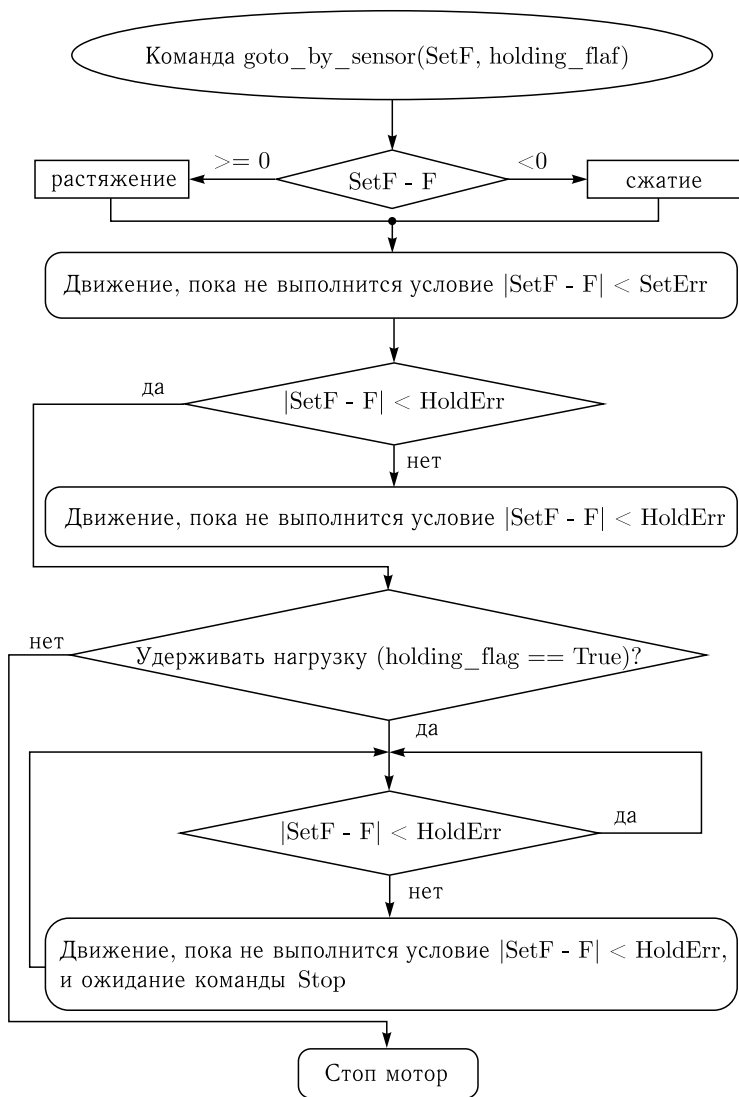


Рис. 7. Структурная схема выхода ШД на заданную нагрузку

- SetErr — задаваемая ошибка, до которой нагрузка изменяется непрерывно,
- HoldErr — ошибка удержания нагрузки, задаются в конфигурационном файле Sonix+.

В случае удержания нагрузки лампочка индикации движения в окне задачи ручного управления шаговым двигателем меняет цвет на желтый.

Выйти из этого режима можно нажатием кнопки *Stop* или посылкой команды *m_stop* мотору из скрипта.

Терморегулятор. Для него реализованы выход на заданную температуру, установка и индикация необходимых параметров прибора.

Визуализация протоколов эксперимента. В отличие от программы ReMeSys в Soplх+ для каждого эксперимента с нагрузочной машиной пишется отдельный протокол (имя файла задается командой в скрипте). Записью протокола занимается устройство *prot_writer*. Период записи в протокол задается в конфигурации устройства и может быть изменен в любой момент командой из скрипта. Протокол пишется в формате ASCII в виде таблицы:

- Абсолютное время: день, месяц, год, час, минута, секунда.
- Относительное время от начала запуска эксперимента в секундах.
- Данные нагрузки, кН.
- Данные экстензометра ОМ501Т, мм.
- Данные экстензометра Миллимар, мм.
- Позиция ШД, шаги.
- Текущая температура, °С.
- Выходная мощность тиристора, %.

Визуализация протоколов выполняется с помощью программы *GraphViewer*.

По оси абсцисс отображается относительное время от начала запуска эксперимента в секундах, по оси ординат — значения выбранного параметра.

Для выбора каталога, отдельного файла протокола или конкретного параметра программа *GraphViewer* имеет окно *Working directory*, в котором показывается список всех каталогов и файлов. При двойном нажатии левой кнопки мыши выбранный каталог или файл раскрываются. Для отображения выбранного графика используется контекстное меню. Панель под графиком позволяет, в частности, выбрать и увеличить фрагмент картинки, настроить параметры графика и т. д. На график можно накладывать произвольное количество других, цвет линии выбирается автоматически, а для легенды выбирается место с минимальным перекрытием нарисованных графиков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Система управления нагрузочной машиной на дифрактометре ФСД разработана и готова к опытной эксплуатации. Проведены тестовые проверки всех устройств, проверено выполнение элементарных скриптов. Следующий этап работ — подключение всех устройств к управляющему компьютеру на дифрактометре и их настройка, а именно для датчика нагрузки и экстензометров определение коэффициентов пересчета показаний прибора в кН и мм соответственно. Настройка параметров ШД будет проводиться непосредственно на самой машине с установленным образцом.

Проведение измерений с нагрузочной машиной планируется провести в одном из осенних циклов реактора ИБР-2 в 2025 г.

Авторы выражают благодарность А. В. Алтынову за помощь в подключении шагового двигателя к контроллеру OSM-42, который используется для управления всеми моторами в комплексе Sonix+, и настройку его скоростных параметров, Н. Д. Зернину за консультации и организацию стенда для работы с терморегулятором Eurotherm-2408, Г. Д. Бокучаве и А. С. Кирилову за замечания по подготовке рукописи.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение №075-10-2025-153 от 5 июня 2025 г).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bokuchava G.* Neutron RTOF Stress Diffractometer FSD at the IBR-2 Pulsed Reactor // *Crystals*. 2018. V. 8. P. 318; <http://doi.org/10.3390/cryst8080318>.
2. *Бокучава Г. Д., Панушкин И. В.*, Нейтронная стресс-дифрактометрия по времени пролета // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2018. № 2. С. 5–11. <http://doi.org/10.7868/S0207352818020014>.
3. <https://www.firebirdsql.org/>
4. TKS-400 Material Research Diffractometer at NPI CAS (Rez near Prague). <https://www.ujf.cas.cz/en/departments/department-of-neutron-and-ion-methods/instruments/lvr15/hk9/>.
5. Development and Applications of Residual Stress Measurements Using Neutron Beams. IAEA Technical Reports. Ser. No.477, IAEA, Vienna. 2014. P.45. <https://www.iaea.org/publications/10506/development-and-applications-of-residual-stress-measurements-using-neutron-beams>.
6. https://sonix-wiki.jinr.ru/doku.php?id=ru:ru_new_gui.

Получено 10 сентября 2025 г.

Редактор *М. И. Зарубина*

Подписано в печать 17.09.2025.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 0,93. Уч.-изд. л. 1,12. Тираж 110 экз. Заказ № 61171.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/