

УДК 621.039

В.Н. Швецов<sup>1</sup>, Н.В. Астахова<sup>2</sup>, Н.А. Гундорин<sup>1</sup>, Т.Л. Еник<sup>1</sup>,  
Ш. С. Зейналов<sup>1</sup>, Л.В. Мицина<sup>1</sup>, Л.Б. Пикельнер<sup>1</sup>, А.Б. Попов<sup>1</sup>,  
И.М. Саламатин<sup>1</sup>, К.М. Саламатин<sup>3</sup>, Г.С. Самосват<sup>1</sup>, П.В. Седышев<sup>1</sup>,  
А.П. Сиротин<sup>1</sup>, В.И. Смирнов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ОИЯИ, Дубна, Россия

e-mail: [salam@nf.jinr.ru](mailto:salam@nf.jinr.ru)

<sup>2</sup> ГУП НИИ “Атолл”, Дубна, Россия

<sup>3</sup> Международный университет “Дубна”, Дубна, Россия

e-mail: [del@tmpk.ru](mailto:del@tmpk.ru)

## МНОГОВХОДОВАЯ СИСТЕМА ТОФ ДЛЯ НЕЙТРОННО-ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО МЕТОДУ ВРЕМЕНИ ПРОЛЕТА НЕЙТРОНОВ

В связи с вводом в строй импульсного источника резонансных нейтронов ИРЕН разработаны новая электроника и соответствующее программное обеспечение для регистрации времяпролетных спектров с малой шириной канала (21 ns). Программно-аппаратная система предназначена для исследования характеристик пучка нейтронов ИРЕН, свойств новых детекторов, а также для проведения прецизионных экспериментов в условиях низкой интенсивности пучка нейтронов или регистрации редких событий.

**Ключевые слова:** импульсный источник, резонансные нейтроны, времяпролетные спектры, нейтроны, детекторы.

### Введение

В связи с временной остановкой реактора ИБР-2 и вводом в эксплуатацию нового источника нейтронов на базе линейного ускорителя ИРЕН [1] существенно уменьшилась интенсивность нейтронов в пучке, используемом в физических экспериментах. Следствием этого явился переход на короткую пролетную базу для экспериментов с использованием метода времени пролета нейтронов, разработка новой электроники для регистрации временных спектров с малой шириной канала и соответствующего программного обеспечения.

В данной работе описывается программно-аппаратная система для регистрации времяпролетных спектров, предназначенная для исследования характеристик нового источника нейтронов (ИРЕН), новых детекторов, а также для выполнения прецизионных экспериментов в новых условиях.

### Описание временного кодировщика

На рис. 1 приведена структурная схема 5-канального (возможно расширение до 8) временного кодировщика. Блок позволяет измерять временные интервалы от сигнала START до момента появления какого-либо сигнала STOP.

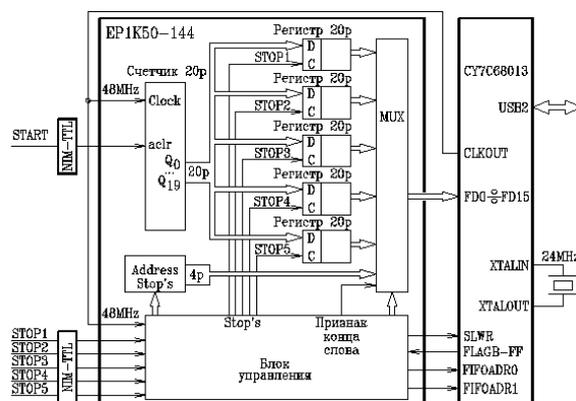


Рис. 1. Структурная схема 5-канального временного кодировщика.

Блок имеет вход START (NIM) и пять входов STOP5,... , STOP1 (NIM). Сигна-

лом START через преобразователь NIM-TTL асинхронно сбрасывается 20-разрядный синхронный счетчик. На вход счетчика поступают импульсы с частотой 48 МГц от микроконтроллера-интерфейса USB2 (CY7C68013). По сфазированным с импульсами 48 МГц сигналам STOP в соответствующие 20-разрядные регистры заносится содержимое 20-разрядного счетчика. Далее через мультиплексор данные с 20-разрядных регистров поступают в микроконтроллер и передаются в компьютер через интерфейс USB2. Блок управления переключает соответствующим образом мультиплексор, вырабатывает сигналы для занесения содержимого счетчика, номера входа зарегистрированного сигнала STOP и признака «конец слова» во внутреннюю память FIFO микроконтроллера. В компьютере сохраняется информация об одном событии в виде четырех байтов. В восьмом разряде старшего байта записан признак «конец слова». В младших разрядах этого байта записан номер входа зарегистрированного сигнала STOP. Информация из соответствующего 20-разрядного регистра распределена в трех младших байтах.

Максимальное время измерения прихода стоповых сигналов 21,8453 мс. При частоте стартового сигнала 50 Гц длительность измеряемого интервала времени равна 19,7973 ms, при 150 Гц – 6,5706 ms. Точность измерения составляет 20,8333 нс. Сигналы STOP, сфазированные с входной частотой счетчика, заносят содержимое счетчика в соответствующий 20-разрядный регистр. После занесения вырабатывается сигнал INT0# (LOW уровень). Затем вырабатывается высокий уровень на линиях адреса FIFO (FIFOADR0 = "1" и FIFOADR1 = "1") и сигнал SLWR# (LOW уровень). Одновременно выставляются данные на входы FD15-FD0. Положительный перепад сигнала SLWR# записывает данные с шины FD во внутреннюю FIFO память микроконтроллера. В результате будут считаны младшие 14 разрядов соответствующего регистра. В первом слове старший разряд FD15=0 и FD7=0. После этого выставляется низкий уровень сигнала

SLWR# для считывания оставшихся разрядов регистра и номера регистра. Во втором 16-разрядном слове FD15=1, а FD7=0. Если больше сигналов STOP не поступило, то процесс заканчивается. Если в других регистрах есть записанная соответствующим стоповым сигналом информация, то продолжается запись в FIFO микроконтроллера. Информация с 20-разрядного регистра записывается в FIFO микроконтроллера двумя словами. Низкий уровень сигнала FULL FIFO (FLAGB) блокирует запись данных в FIFO микроконтроллера.

### Программное обеспечение системы TOF

Программное обеспечение системы TOF работает под управлением операционной системы Windows и включает:

- программы драйверного слоя;
- управляющую программу;
- программу управления сортировкой данных;
- программу обработки данных;
- служебные программы.

### Драйверный слой программ

Разработаны две программы драйверного слоя. Одна из этих программ, BulkRead, в соответствии с технологией фирмы [2], написана на языке C, реализует bulk-интерфейс для всех входов, по которым поступают данные о времени пролета нейтронов от детекторов, и предназначена для работы на микропроцессоре USB-интерфейса. Вторая программа, TOFusb, работает на ЭВМ, к которой подключается USB-интерфейс. При старте программа TOFusb записывает программу BulkRead в память микропроцессора разработанного USB-интерфейса. По команде START она запускает процесс чтения данных от детекторов и записи их во входной буфер программы сортировки. Каждое событие, зарегистрированное детектором, описывается кадром из 4-х байтов, где кодируется время пролета нейтрона (20 бит) и номер входа (детектора). По заполнении входного буфера включается сортировка данных в

буфера спектров в оперативной памяти ЭВМ.

Алгоритм сортировки использует табличное описание оси времени формируемых спектров, задаваемое программой управления сортировкой (программой Time Scale – см. ниже). Благодаря этому для любого варианта описания временной диаграммы время сортировки одно и то же и составляет 22 нс/событие на ЭВМ с частотой процессора 2,8 GHz. Помимо спектров с заданной пользователем временной диаграммой, можно разрешить формирование вспомогательных спектров с фиксированной шириной канала 41,6 нс, полностью перекрывающих максимальное временное окно. Включение формирования такого вспомогательного спектра увеличивает время сортировки события на 10 %.

Программа TOFusb написана на языке C++ Builder, представлена в исполняемом (.exe) формате, загружается и выгружается в нужные моменты времени управляющей программой TOF.

### Управляющая программа TOF

Программа TOF – интерфейс пользователя к системе регистрации времяпролетных спектров. Окно управления программой показано на рис. 2. Программа имеет 3 страницы, соответствующие основным режимам работы, и несколько окон, создаваемых вызываемыми функциональными модулями.

Названия страниц и режимы работы следующие:

- “Single file” – регистрация одиночного файла (спектра);
- “Files by cycle” – регистрация файлов в цикле;
- “Auto control” – автоматическое изменение условий регистрации данных.

Для каждого режима работы программа заводит свое дерево каталогов. В отдельные каталоги заносятся данные каждого детектора. Названия файлов формируются автоматически, в название включается текстовая метка, задаваемая пользователем.

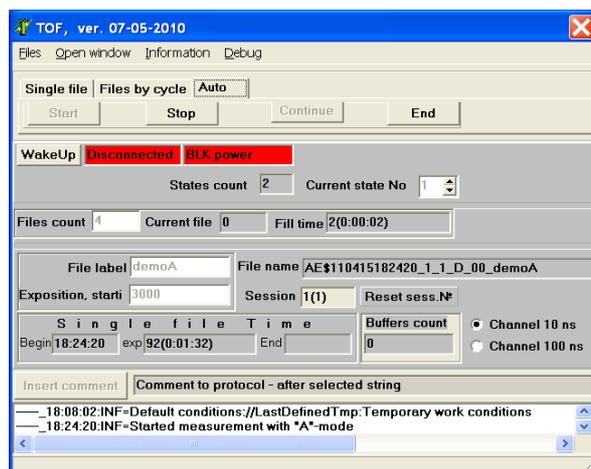


Рис. 2. Окно управления программой TOF.

В разных режимах используются разные шаблоны названий файлов. Всегда создаются списки названий файлов, предназначенные для автоматизации обработки данных. Ведется протокол работы программы TOF, в котором отмечаются существенные события: изменение режима работы, изменение условий регистрации данных, запись файла, возникновение сбоев и ошибок и т.д. Новый файл протокола автоматически заводится при смене суток. Название файла формируется автоматически и включает дату его создания.

Программа TOF всегда продолжает ранее прерванную работу, восстанавливая ранее заданные пользователем значения управляющих переменных и состояние прерванных процедур.

### Регистрация одиночных файлов

Данный режим предназначен для случая, когда пользователь часто меняет условия регистрации данных – например, для новой пролетной базы и детектора проверяет работу с заданной временной диаграммой. Протоколируется изменение условий регистрации и факт записи файла. При изменении условий регистрации программа заводит новый номер группы регистрируемых файлов. После записи файла автоматически изменяется порядковый номер файла в группе. Имена файлов формируются автоматически и включают дату, время создания файла, номер группы файлов, номер детектора, номер файла в

группе и заданную пользователем текстовую метку, отражающую тему исследования. Пользователь задает продолжительность экспозиции данных и текстовую метку в названии файлов. Для управления регистрацией предоставлены 4 кнопки: Start, Stop, Continue, End. Назначение кнопок соответствует названиям.

### **Регистрация файлов в цикле**

При большой продолжительности экспозиции состояния есть несколько очевидных причин к тому, чтобы разбить полную экспозицию на последовательные интервалы более коротких измерений и зарегистрировать файлы с частичной экспозицией. Именно для таких измерений введена страница "File by cycle". Пользователь в полях значений параметров страницы "Single file" (видимых в любом режиме) задает продолжительность измерения отдельного файла и текстовую метку названия файла, а в полях параметров страницы "File by cycle" задает количество таких файлов. Программа составляет список файлов, измеренных при заданных условиях. Такой список предназначен для специальной программы «Экспресс-анализ», которая позволяет проконтролировать совместимость (корректность) данных, полученных в отдельных экспозициях, для получения файлов суммарной экспозиции. Название файлов частичной экспозиции, файла со списком названий файлов, которые должны анализироваться совместно, формируются автоматически.

Как и для предыдущего режима, для управления работой введены кнопки Start, Stop, Continue, End. Система продолжает прерванную работу. Поэтому, если работа была прервана на данной странице, то после повторной загрузки программа разрешит использование кнопок Continue и End.

### **Автоматическое изменение условий регистрации данных**

Данная страница предназначена для регистрации данных при автоматическом изменении условий окружения образца

(например, смены мишеней, включения/выключения поляризации и т.п.). В процессе накопления нужной статистики условия окружения образца неоднократно чередуются, и для каждого из состояний составляется свой список зарегистрированных файлов. В дальнейшем каждый из этих списков, соответствующих исследованным состояниям мишеней, может быть использован для контроля качества зарегистрированных данных, автоматизированной обработки или коррекции.

### **Программная общая шина**

Взаимодействие между управляющей программой TOF и драйверным слоем (программой TOFusb) осуществляется через "программную общую шину" (ПОШ). ПОШ реализуется разработанной функцией API GetODB, которая захватывает ресурс оперативной памяти нужного размера, и модулем, который "накладывает" на эту память описание нужной структуры данных. Функция GetODB создает поименованный файл, отображенный в память (реализовано в ОС Windows), или находит созданный ранее, и возвращает вызывающей программе указатель на этот участок памяти. Всем программам, подключившимся к ПОШ, предоставляется одни и те же значения всех переменных, описанных в структуре данных, наложенной на ПОШ. Любая программа может изменять значения этих переменных, используя семафор для устранения конфликтов при одновременном обращении к одной переменной.

Образ ПОШ сохраняется в памяти до тех пор, пока к ней подключен хоть один пользователь (процесс). Благодаря этому во время работы системы TOF могут загружаться различные программы и получать быстрый доступ к одному и тому же содержанию данных в ПОШ.

Структура данных в ПОШ включает:

- группу управляющих параметров для драйверного слоя, в числе которых таблицы, управляющие сортировкой данных;

• буфера спектров, заполняемые в режиме On-Line программами сортировки и др.

Функция API GetODB не зависит от конкретного варианта описания структуры данных и может быть использована в различных проектах без изменения.

### Управление временной диаграммой программы сортировки

Программа сортировки строит спектры (гистограммы) количества зарегистрированных нейтронов в зависимости от времени пролета дистанции от источника до детектора нейтронов. Ось времени программе сортировки представляется в виде последовательности каналов (ячеек памяти). Каждому каналу соответствует определенный интервал времени пролета нейтронов. Полное описание этой оси, необходимое для установления соответствия между номером канала и временем пролета нейтронов, задается следующими параметрами:

1. Время задержки вспышки нейтронов относительно стартового импульса от источника нейтронов;
2. Время задержки начала регистрации и сортировки данных относительно вспышки нейтронов. Даная задержка определяет также сдвиг начала оси времени спектра относительно вспышки нейтронов;
3. 8 временных интервалов, для каждого из которых задается его длина (количеством каналов) и ширина канала в дискретах по 20,8 нс;
4. Частота вспышек нейтронов, определяющая максимальную протяженность окна для регистрации нейтронов.

Полное количество каналов определяется суммой по всем 8 интервалам, но принудительно ограничено и не может быть более 10000. Временное окно, в течение которого регистрируются нейтроны, определяется суммой продолжительностей используемых интервалов и заданными задержками или периодом следования импульсов вспышек ускорителя. Энергия нейтронов (эВ) определяется по формуле:

$$E=(72.3*L/t)^2,$$

где  $L$  – длина пролетной базы, м,  
 $t$  – время пролета нейтрона, мкс.

Для задания этих параметров введена программа TimeScale (см. рис. 3), вызываемая из программы управления. Каждое сочетание параметров может быть записано в файл, а файл помечен строкой комментария пользователя (для последующей идентификации его при поиске) и помещен в архив. Любой из этих файлов может быть выбран из архива для дальнейшего использования по умолчанию.

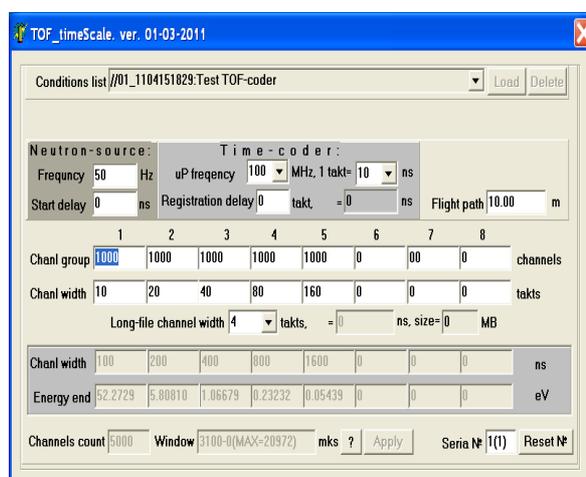


Рис. 3. Окно управления временной диаграммой.

При изменении используемой шкалы сортировки данных инкрементируется значение параметра, названного Group (номер группы файлов) и обнуляется счетчик файлов в группе. Номер группы и файла включаются в название файла. Факт изменения используемой шкалы времени отмечается в протоколе работы.

### Визуализация спектров

Программа имеет 8 трактов изображения данных, что позволяет поместить в одном окне до 8 спектров в одной системе координат (см. рис. 4). Первые 4 тракта закреплены за 4-мя детекторами. Во время регистрации данных может использоваться режим автоматического обновления изображения с периодом, задаваемым пользователем.

С изображением в каждом тракте возможны быстрые операции: включить/выключить изображение, сместить по вертикали, умножить поканально на заданное число, копировать данные в другой тракт, загрузить в тракт данные из файла и др.

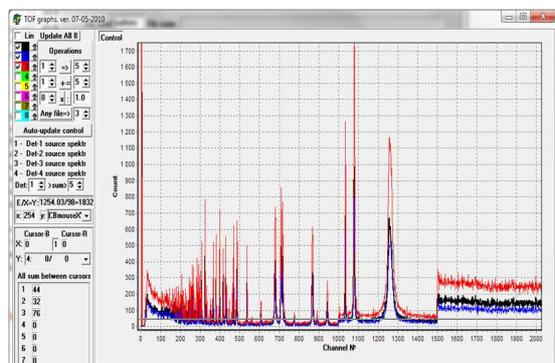


Рис. 4. Программа визуализации данных.

Мышь и два курсора дают информацию об энергии и количестве отсчетов нейтронов в любом канале, для каждого спектра выводится сумма отсчетов в интервале, ограниченном двумя курсорами. Введены необходимые операции быстрого управления визуализируемым кадром с помощью мыши.

### Программа экспресс-анализа данных

В некоторых прецизионных экспериментах (исследование свойств поляризованных частиц и мишеней, эффектов несохранения четности и др.) время измерения составляет десятки часов, при этом существенную роль приобретает учет возможного дрейфа во времени параметров регистрирующей системы. С целью раннего обнаружения существенных искажений регистрируемых спектров и фильтрации сомнительных данных разработан алгоритм экспресс-анализа данных, подробно описанный в работе [3]. На основе этого алгоритма разработана подсистема экспресс-анализа данных ЕА. Подсистема ЕА выполнена в виде модуля в загружаемом (.exe) формате и может работать в двух режимах:

- автоматическом режиме во время регистрации и накопления данных;

- режиме OffLine для анализа ранее накопленных данных.

Данная подсистема может быть загружена на удаленных ЭВМ, подключена к TOF по известному IP-адресу и переведена в режим автоматического анализа. В этом случае протокол совместного анализа данных предоставляется пользователю после записи каждого файла. При возникновении нарушения заданных критериев достоверности данных может выработываться предупредительный сигнал.

### Заключение

Система разработана для выполнения времяпролетных экспериментов на источнике нейтронов ИРЕН. С использованием данной системы была выполнена часть исследований, доложенных в работе [1]. На рис. 5 приведен времяпролетный спектр нейтронов, полученный на 9-метровой пролетной базе установки ИРЕН. Нейтроны регистрировались гелиевым счетчиком СНМ-17. Регистрировались 3 группы каналов с различной шириной:

- каналы 1 .. 1000, ширина 21 нс;
- каналы 1001 .. 5000, ширина 210 нс;
- каналы 5001 .. 8000, ширина 2100 нс.

Конструктивное исполнение USB-интерфейса обеспечивает системе мобильность, предполагается использовать ее также в выездных экспериментах.

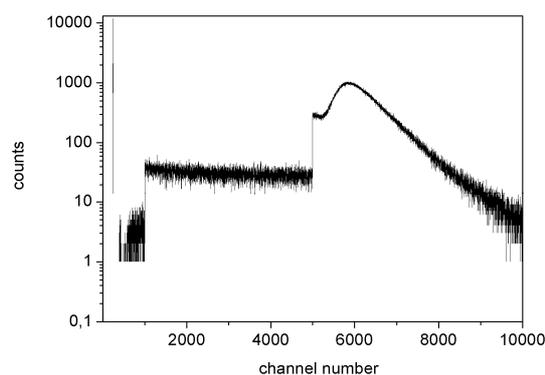


Рис. 5. Спектр нейтронов от источника ИРЕН, полученный на 9-метровой пролетной базе.

Взаимодействие программ через рабочую область, названную “программная общая шина”, оказалось удобным.

Реализация ПОШ возможна и в других ОС [4], и авторы рекомендуют использование этого приема для организации взаимодействия программ, представленных в формате загрузки.

Подсистема экспресс-анализа представлена в исполняемом (.exe) формате и может быть без изменения использована в составе других систем автоматизации эксперимента.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Shvetsov V.N. Physical startup of the first stage of IREN facility // ISINN-16. – 27-30.05.2009. Dubna.
2. <http://www.cypress.com/products/?gid=9&fid=14&rpn=CY7C68013A>
3. Гундорин Н.А., Дикусар Н.Д., Мазный Н.Г. и др., Экспресс-анализ спектров в прецизионных экспериментах // Известия РАН, сер. Физическая. – 2009. – Т. 73. – №2. – С. 261-263.
4. [http://habrahabr.ru/blogs/nix\\_coding/55716/](http://habrahabr.ru/blogs/nix_coding/55716/)

Стаття надійшла до редакції 30.05.2011

V.N. Shvensov<sup>1</sup>, N.V. Astachova<sup>2</sup>, N.A. Gundorin<sup>1</sup>, T.L. Enik<sup>1</sup>,  
Sh.S. Zeinalov<sup>1</sup>, L.V. Mitsina<sup>1</sup>, L.B. Pikelner<sup>1</sup>, A.B. Popov<sup>1</sup>,  
I.M. Salamatin<sup>1</sup>, K.M. Salamatin<sup>3</sup>, G.S. Samosvat<sup>1</sup>, P.V. Sedishev<sup>1</sup>,  
V.I. Smirnov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> JINR, Dubna, Russia

e-mail: [salam@nf.jinr.ru](mailto:salam@nf.jinr.ru)

<sup>2</sup> Institute "Atoll", Dubna, Russia

<sup>3</sup> University "Dubna", Dubna, Russia

e-mail: [del@tmpk.ru](mailto:del@tmpk.ru)

## MULTICHANNEL SYSTEM TOF FOR NEUTRON-NUCLEAR INVESTIGATIONS BY TIME-OF-FLIGHT METHOD

In connection with commissioning of the IREN pulsed resonance neutron source new electronics and appropriate software are developed for registration of time-of-flight spectra with small width of the channel (21 ns). The hardware-software system is intended for research of the IREN neutron beam characteristics, properties of new detectors, and also for performance of precision experiments under conditions of low intensity or registration of rare events.

**Key words:** pulsed source, resonance neutrons, the spectra of TOF, neutrons, detectors.

В.Н. Швецов<sup>1</sup>, Н.В. Астахова<sup>2</sup>, Н.А. Гундорин<sup>1</sup>, Т.Л. Єник<sup>1</sup>,  
Ш. С. Зейналов<sup>1</sup>, Л.В. Міцина<sup>1</sup>, Л.Б. Пикельнер<sup>1</sup>, А.Б. Попов<sup>1</sup>,  
І.М. Саламатин<sup>1</sup>, К.М. Саламатин<sup>3</sup>, Г.С. Самосват<sup>1</sup>, П.В. Седишев<sup>1</sup>,  
А.П. Сиротин<sup>1</sup>, В.І. Смирнов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ОІЯД, Дубна, Росія

e-mail: [salam@nf.jinr.ru](mailto:salam@nf.jinr.ru)

<sup>2</sup> ДУП НДІ “Атолл”, Дубна, Росія

<sup>3</sup> Міжнародний університет “Дубна”, Дубна, Росія

e-mail: [del@tmpk.ru](mailto:del@tmpk.ru)

## БАГАТОВХІДНА СИСТЕМА ТОФ ДЛЯ НЕЙТРОННО- ЯДЕРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ МЕТОДОМ ЧАСУ ПРОЛЬОТУ НЕЙТРОНІВ

У зв'язку з введенням в дію імпульсного джерела розсіяних нейтронів IREN розроблено нову електроніку і відповідне програмне забезпечення для реєстрації часопрольотних спектрів з малою шириною каналу (21 нс). Програмно-апаратна система призначена для дослідження характеристик пучка нейтронів IREN, властивостей нових детекторів, а також для проведення прецизійних експериментів в умовах низької інтенсивності пучка нейтронів чи реєстрації рідкісних подій.

**Ключові слова:** імпульсне джерело, резонансні нейтрони, часопрольотні спектри, нейтрони, детектори.