

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА ВИМІРЮВАНЬ НЕЙТРОННИХ ПАРАМЕТРІВ ПІДКРИТИЧНИХ ЯДЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ

Ф. Н. Березін, А. П. Войтер, В. М. Павлович, В. О. Кісурін, І. О. Мазний, О. М. Ковальов, М. І. Доронін, С. А. Стороженко

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ

Розглянуто методику та багатоканальну вимірювальну систему нового покоління для визначення нейтронних параметрів підкритичних ядерних матеріалів, основу на прецизійному вимірюванні інтервалів часу між сигналами детекторів нейтронів, що забезпечує її інваріантність до методів обробки експериментальних даних.

Вступ

Для визначення стану підкритичних ядерних систем (коефіцієнта розмноження, кількості палива та інших параметрів) у 50 - 60-ті роки минулого сторіччя було запропоновано декілька статистичних методів обробки експериментальної інформації: метод Россі-альфа, метод Фейнмана, метод Могільнера - Золотухіна та їх подальші модифікації (див., наприклад, [1, 2]). Усі вони ґрунтуються на експериментальному вимірюванні деяких статистичних характеристик (для кожного методу різних) розподілів зареєстрованих нейтронів, причому для кожного методу розроблялася оригінальна електроніка. Основною особливістю розробленої автоматизованої системи є фіксація часу події, що для нейтронних систем означає фіксацію часу реєстрації кожного нейтрона детектором. Таким чином, файл даних із записаними інтервалами часу між послідовними реєстраціями нейтронів дає первинну інформацію по флуктуаціях нейтронного потоку (або по нейтронних шумах), яку можна обробляти програмними методами відповідно до тої чи іншої теоретичної моделі, тобто на відміну від відомих запропонована система є інваріантною до методу статистичної обробки експериментальних даних. Наприклад, у методі Фейнмана пропонується вимірювати відношення дисперсії до середньої кількості відліків за даний інтервал часу, а в методі Могільнера - Золотухіна пропонується вимірювати нульову ймовірність, тобто відсутність відліків детектора за даний інтервал часу. Можна також вимірювати вищі моменти розподілів, що дає додаткову інформацію про ядерну систему. Запропонована автоматизована система з подальшою програмною обробкою дозволяє отримати будь-які статистичні характеристики розподілу нейтронів.

Архітектура системи

Архітектура системи вимірювання нейтронних параметрів підкритичних ядерних матеріалів представлена на рис. 1. Система скомпонована

на основі n блоків вимірювання часу (БВЧ), з яких один (n -й) є головним, що зроблено з метою мінімізації кількості ліній переривання, що подаються на системний комп'ютер. Вимірювачі часу об'єднані двома шинами – шиною ВЧ для передачі до головного блока сигналу половинного заповнення пам'яті L та коду номера блока N і шиною ISA для взаємодії блоків із системним комп'ютером.

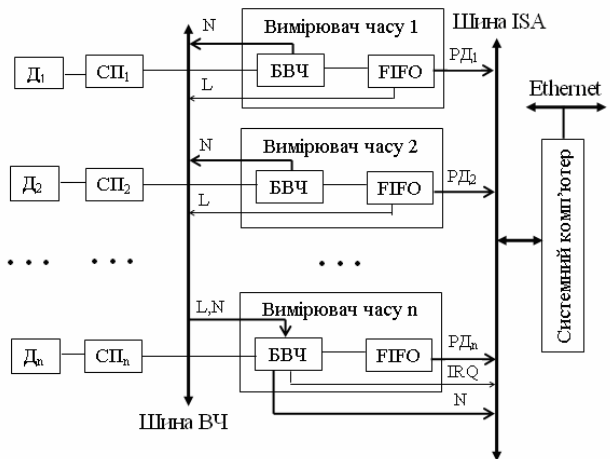


Рис. 1. Архітектура системи.

Сигнали від детекторів нейтронного випромінювання D_1, D_2, \dots, D_n після підсилення спектрометричними підсилювачами (СП) $СП_1, СП_2, \dots, СП_n$ фіксуються відповідними вимірювачами часу. Кожен імпульс маркується часом його появи на вході вимірювача часу і код цього часу записується в пам'ять типу FIFO. Після половинного заповнення об'єму пам'яті вимірювачем часу генерується сигнал L . Головний вимірювач часу, отримавши сигнал L від будь-якого з підпорядкованих вимірювачів часу або при заповненні власної пам'яті, зчитує з шини ВЧ код (номер) вимірювача часу, який надіслав L , генерує сигнал переривання IR_Q , який супроводжується вищеназваним кодом. Системний комп'ютер за отриманим номером ініціює зчитування даних R_{D_i} з пам'яті вимірювача часу.

Зв'язок між ВЧ та системним комп'ютером здійснюється через шину ISA за допомогою чотирьох регістрів. Призначення та зміст регістрів в операціях зчитування та запису наведено в табл. 1, де позначено БА – базова адреса, М – master, S – slave.

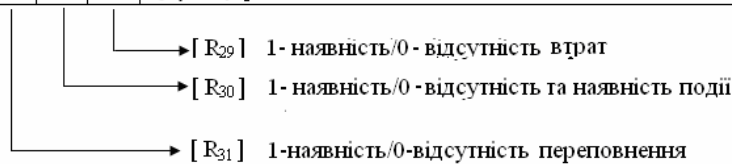
При наявності аналогового сигналу на вході ВЧ, рівень якого перевищує заданий поріг, ВЧ формує чотирибайтний код події та переписує його в пам'ять FIFO. Старші три розряди R₃₁, R₃₀, R₂₉ старшого байта коду події визначають тип даних. Опис форматів даних при зчитуванні пам'яті наведено в табл. 2.

Таблиця 1. Регістри ВЧ

Регістр	Зчитування	Ознака модуля	Запис
БА + 0	Зчитування пам'яті FIFO	M/S	Запис порогу дискримінатора нижнього рівня
БА + 1	Ознака завершення зчитування пам'яті FIFO	M	STOP
БА + 2	Код ВЧ, що сформував запит на обслуговування (R ₄ - R ₂)	M	START
БА + 3	Регістр стану ВЧ	M/S	Регістр управління ВЧ

Таблиця 2. Формати даних зчитування

R ₃₁ ÷ R ₂₄			R ₂₃ ÷ R ₁₆	R ₁₅ ÷ R ₈	R ₇ ÷ R ₀
7	6	5	4 ÷ 0	7 ÷ 0	7 ÷ 0
0	1	0	x	Код часу	
0	1	1	x	Код часу + були втрати	
1	0	0	Кількість переповнень лічильника часу		
1	0	1	Кількість переповнення лічильника часу + були втрати		
1	1	0	Кількість переповнення лічильника часу + була подія		
1	1	1	Кількість переповнення лічильника часу + була подія + були втрати		



Таблиця 3. Регістр стану ВЧ

R ₇	1 – ініційовано START; 0 – ініційовано STOP
R ₆	1 – є дані в пам'яті FIFO; 0 – немає даних
R ₅	1 – ½ пам'ять FIFO заповнена наполовину; 0 – не заповнена
R _{4...R₀}	не використовуються

У розрядах 0 - 7 регістра БА + 0 є можливість задати значення порога спрацювання дискримінатора нижнього рівня ВЧ з метою відмежування від завад на аналоговому вході. Код дискримінатора нижнього рівня в діапазоні 0 ÷ 255 відповідає зміні порога від 0 до 2,5 В.

Регістр стану ВЧ призначено для контролю за станом ВЧ у процесі його роботи. Опис станів ВЧ та відповідні значення біт регістра наведено в табл. 3. Біт 7 встановлюється в 1 після отримання команди START, а в 0 – за командою STOP. Біт 6 вказує на наявність даних у пам'яті (використовується після зупинки перетворення та зчитування даних, що залишились). Біт 5 вказує на те, що пам'ять заповнена на половину своєї ємності та на наявність запиту переривання.

У регістрі управління ВЧ використовується лише 0 розряд. При запису в нього 1 ВЧ буде генерувати переривання по наявності в пам'яті лише одного коду події, при запису 0 – по заповненню пам'яті наполовину.

Технічні складові системи

Для реалізації системи спеціально розроблено СП та прецизійний БВЧ (рис. 2).

ДП виконано на мікросхемі AD8066AR. Переключення постійних часу диференціювання реалізовано на мікросхемі ADG453BR. Установлення полярності вихідного сигналу залежно від полярності вхідного сигналу здійснюється за допомогою перемикачів. МП реалізовано на мікро-

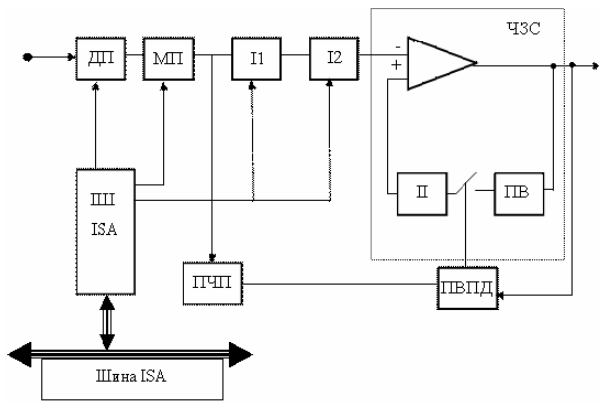


Рис. 2. Функціональна схема СП:

ДП - диференціючий підсилювач; МП – масштабуючий підсилювач; І1, І2 - інтегратори; ЧЗС - часозалежний стабілізатор; ПЧП - пристрій часової прив'язки; ПВПД - пристрій визначення повної довжини; ІІІ - інтерфейс шини.

схемах AD8066AR та AD826AR. Інтегратори І1 та І2 збудовані як активні фільтри нижніх частот другого порядку з комплексними полюсами (AD826AR). Постійна часу інтегрування змінюється програмно за допомогою мікросхеми ADG711BR одночасно зі зміною постійної диференціювання на вході підсилювача. ПЧП реалізовано на мікросхемах LM319M та CD4098BM. ПВПД являє собою компаратор, опорна напруга якого встановлюється на рівні шумової напруги використовуваного джерела сигналу. Управління коефіцієнтом підсилення та значеннями постійної часу формування підсилювача здійснюється по шині ISA. Зміна коефіцієнта підсилення та постійної часу формування здійснюється шляхом одnobайтної передачі по шині даних інтерфейсу ISA відповідного коду.

Технічна характеристика СП

Вхідний опір, ком	1 ± 0,05
Вхідна ємність, пф	10
Полярність вхідних імпульсів	+ чи -
Час наростання вхідних імпульсів, нс	не більше 200
Постійна часу спаду вхідних імпульсів, мкс	не менше 50
Амплітуда вхідних імпульсів, В	не більше 5
Максимальна амплітуда вихідного сигналу на опорі 1 кОм, В	5,5
Форма вихідного сигналу	гауссоподібна
Програмне переключення постійної часу формування τ, мкс	0,5 та 2
Час наростання вихідного сигналу	2,2 τ
Тривалість вихідного сигналу	6,5 τ,
Вихідний опір, Ом	50
Зміна коефіцієнта підсилення при переключенні постійних часу, %	не більше 10.
Діапазон значень коефіцієнт підсилення	від 1 до 1250
Програмне переключення коефіцієнта підсилення ступенями	10, 20, 50; 100; 200; 500
Плавне регулювання коефіцієнта підсилення	від 1 до 2,5
Атенюатор	x0,1
Інтегральна нелінійність у робочому діапазоні амплітуд, %	не більше 0,05
Нестабільність коефіцієнта підсилення за 8 год безперервної роботи, %	не більше 0,2
Максимальне вхідне завантаження при τ = 2 мкс, імп/с	≤ 1,0 · 10 ⁵
Час відновлення базової лінії після впливу перевантаження	не більше 15 τ
Живлення підсилювача	від PC
Компенсація полюса нулем та стабілізатор базової лінії	+
Зміна коефіцієнта підсилення в робочому діапазоні температур, % на градус	≤ 0,02
Системний інтерфейс	ISA
Габаритні розміри, мм	190 × 120 × 25

Конструктивно на одній платі розташовано два СП (рис. 3).

Блок вимірювача часу

Для реалізації системи також розроблено БВЧ (рис. 4).

КГ виконано на основі резонатора КХО0210-100 МГц, ПП_і – на основі буферних елементів 74AC125, а СВ – з використанням мікросхем AD826AR, CMP402GS та AD5330. Логіка роботи

інтерфейсів ВЧ та ISA, а також блоків СУЗ і УЗП реалізована в програмованій логічній матриці EPM7160SLC84-10n. Там же реалізовано ЛЧ і ПЛЧ. В якості П(FIFO) залежно від потреби використано уніфікований набір мікросхем IDT720x ємністю від 2048 до 65636 Кбайт, що забезпечує одночасний запис та читування з часом від 12 до 50 нс. У мікросхемах передбачено індикатори стану “пусто”, “напівзаповнено” та “заповнено”, що суттєво спрощує програмування.

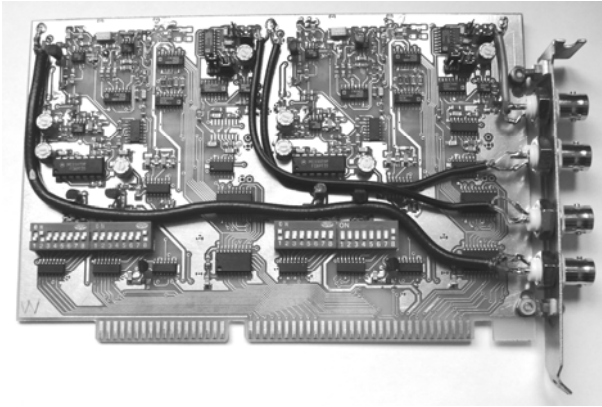


Рис. 3. Плата СП.

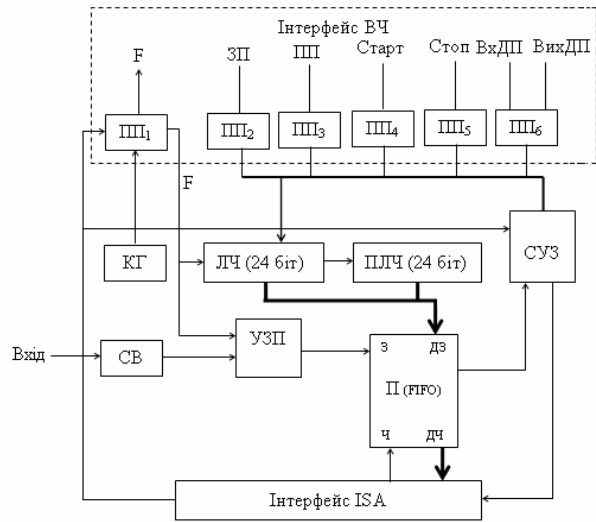


Рис. 4. Функціональна схема БВЧ:

ПП_i - прийомо-передавач; КГ - кварцовий генератор 100 МГц; ЛЧ - лічильник; ПЛЧ – переповнення лічильника; СУЗ - схема управління запитами; П(FIFO) - пам'ять з обслуговуванням по алгоритму FIFO; УЗП - управління записом; СВ - схема відбору; ЗП - запит переривання; ПП - підтвердження переривання; ВхДП - вхід дозволу переривання; ВихДП - вихід дозволу переривання; З - запис в пам'ять; Ч - зчитування з пам'яті; ДЗ - дані запису; ДЧ - дані зчитування.

Технічна характеристика вимірювача часу

Частота імпульсів генератора, МГц	100
Полярність вхідного сигналу	+/-
Амплітуда вхідного сигналу, В	0,2 або з виходу СП
Фронт вхідного сигналу, мкс	≥ 0,4
Спад вхідного сигналу, мкс	≥ 0,4
Носій вхідного сигналу	коаксіальний кабель L = 500, ρ = 50
Ширина часового каналу, нс	10
Вимірюваний часовий інтервал, нс	≥ 10
Ємність буферної пам'яті, Кбайт	16
Інтервал переривання, Кподій	8
Обмеження на інтенсивність подій	немає
Системний інтерфейс	ISA
Споживані струми при + 12 В/- 12 В/+5В, мА	20/20/150
Габаритні розміри, мм	20 × 110 × 180

БВЧ виконано у вигляді плати, яка встановлюється в розширювач шини ISA (рис. 5).

До складу системи входять також серійні компоненти:

одноплатний системний комп'ютер у промисловому виконанні IOWA-GX, технічні характеристики якого наведено в [3];

розширювач шини ISA BP-14S-RS-R30.

Система вимірювань нейтронних параметрів підкритичних ядерних матеріалів реалізована в корпусі персонального комп'ютера з підсиленням блоком живлення (рис. 6).

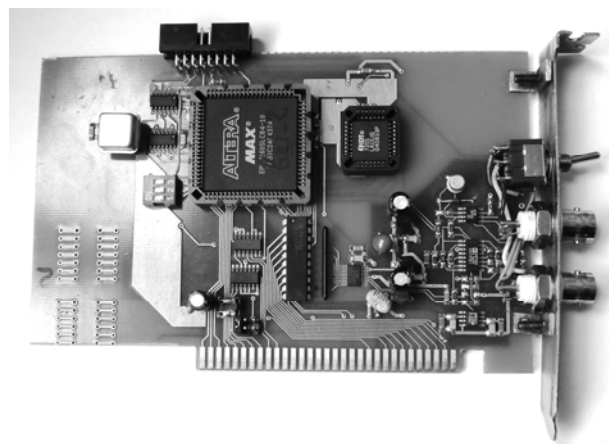


Рис. 5. Вимірювач часу.

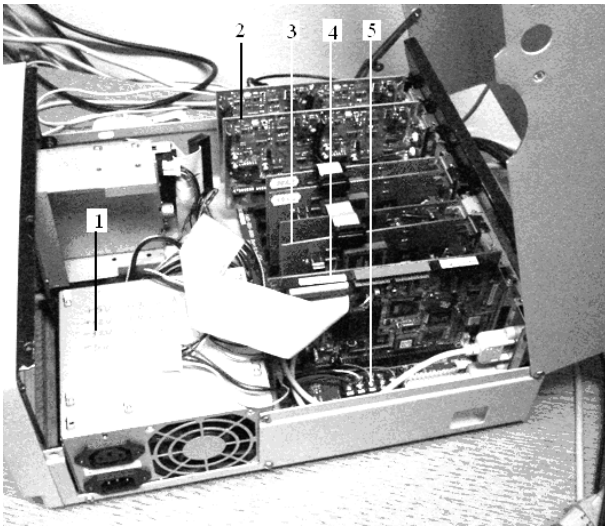


Рис. 6. Загальний вигляд системи: 1 - блок живлення; 2 - плати СП; 3 - плати БВЧ; 4 - системний комп'ютер; 5 - розширювач шини.

Програмне забезпечення системи

Програмне забезпечення системи (ПЗ) дає змогу налагоджувати сценарії експерименту, проводити калібровку вимірювальних трактів, здійснювати вимірювання в реальному масштабі часу з одночасною архівацією та візуалізацією експериментальних даних, переглядати та аналізувати дані.

У реальному масштабі часу проводяться первісна математична обробка та допусковий контроль значень параметрів, що вимірюються. Уся інформація зберігається й доступна для наступної обробки та аналізу.

У ПЗ передбачено можливість організації розподіленої системи вимірювань, дані в якій передаються по мережі Ethernet на сервер. ПЗ організовано за модульним принципом і складається з чотирьох частин (рис. 7).



Рис. 7. Структура ПЗ.

Модуль підготовки проведення вимірювань дає змогу здійснювати такі функції:

1. Вибір часових і граничних характеристик вимірювальних каналів з бази даних або з текстового файлу, в якому зберігаються параметри дискримінації і частоти.

2. Конфігурування набору даних (послідовність опитування каналів і з якою частотою, ви-

бір каналів, на яких необхідно провести первинну математичну обробку, тривалість набору, налагодження файлової системи зберігання даних).

3. Створення каналів для передачі даних по мережі Ethernet.

4. Налаштування системи візуалізації в реальному масштабі часу (вибір каналів, що цікавлять, та розрахунок статистичних характеристик роз-

поділів; кількість графіків на одній осі; налагодження оцифровки по осях; вибір гами кольорів відображення графіків).

5. Занесення супутньої інформації, необхідної для подальшої ідентифікації експерименту та його параметрів (найменування, короткий опис, умови проведення тощо).

6. Запуск експерименту на виконання.

Програмне забезпечення підготовки та проведення експерименту «Composer» забезпечує запуск у реальному часі модуля реєстрації даних «Registrar» і модуля візуалізації в масштабі реального часу «Visualizer», а також організує запис у файли результатів експерименту.

Модуль проведення вимірювань зчитує дані з файла конфігурації експерименту і здійснює проведення вимірювань відповідно до обраних параметрів. Візуалізація потоку даних здійснюється в режимі вимірювань відповідно до налагодження експерименту у вигляді гістограми та цифрових панелей. Результати вимірювань відображаються в заданих одиницях фізичних величин. У режимі реального часу відбувається контроль завантажень по кожному з трактів із відображенням результатів на моніторі. Передбачено ведення журналу вимірювань. Перед початком і після закінчення експерименту оператор заносить додаткову інформацію: характеристики процесу вимірювань, зауваження до вимірювань, що проводились, тощо.

Збір даних проводиться протягом усього експерименту. На диску зберігаються всі дані за проміжок часу тривалістю, зазначеною в параметрах експерименту. Механізм набору даних організований за принципом подвійної буферизації. Буфер, що являє собою область, виділену в оперативній пам'яті, ділиться на дві частини. Спочатку дані записуються в першу частину буфера. Як тільки вона буде заповнена, дані з неї відправляються на обробку і зберігаються на диску, а наступні дані починають заноситися в другу частину буфера. При заповненні другої частини починає знову заповнюватися перша, а дані з другої частини передаються на обробку. Таким чином, процес заповнення частин буфера йде по колу. Обробка однієї частини буфера й запис в іншу відбуваються одночасно.

Модуль перегляду та аналізу результатів («Analyzer») призначений для післясеансової роботи з експериментальними та теоретичними даними. Одночасно можуть оброблятися дані різних вимірювань, що зберігаються у файлах даних результатів експериментів. Програмне забезпечення перегляду й аналізу результатів передбачає вибір будь-

яких результатів вимірювань, а також перегляд ідентифікаційної й додаткової інформації.

Модуль «Visualizer» дозволяє переглядати результати вимірювань у вигляді графіків $Y = f(t)$ – часової залежності або гістограм розподілів.

Графіки можна масштабувати і „прокручувати”. Графіки із загального обсягу даних довільно вибираються й накладаються один на одного. Для зручності порівняння є можливість оперативного включення/відключення режиму відображення кожного з графіків. Модуль «Visualizer» забезпечує маркерну обробку даних (система поточкових та інтервальних вимірювань), що дає змогу визначати відстань між будь-якою парою точок графічної площини й визначати значення в характерних точках.

Модуль післясеансової обробки даних дає змогу проводити вторинну обробку отриманих даних за допомогою математичної бібліотеки. До математичної бібліотеки входять функції математичної статистики, обробки масивів даних, цифрової фільтрації, спектрального й кореляційного аналізу тощо.

ПЗ дає змогу проводити експорт даних у текстові файли для сервісних режимів вторинної обробки даних (конвертори у файли даних Matlab, Excel тощо) і зворотне перетворення (імпорт даних) для зберігання й візуалізації.

ПЗ функціонує під управлінням системи реального часу засобами програмування C++. Налаштування ПЗ і робота з ним здійснюються за допомогою діалогових вікон. ПЗ може функціонувати як на одному комп'ютері, так і з використанням клієнт-серверних технологій у рамках розподіленої системи збору й обробки даних.

Висновки

Розроблено автоматизовану систему для суттєвого спрощення та збільшення роздільної здатності процесу накопичення даних при виконанні вимірювань нейтронних параметрів підкритичних ядерних матеріалів.

Система може бути використана для оцінки та прогнозування ядерної безпеки скупчень ядерних матеріалів (зупинені реактори, сховища відпрацьованого та свіжого палива тощо). Це дозволить здійснювати вимірювання коефіцієнта розмноження нейтронів у скупченнях ядерних матеріалів із мінімальною похибкою, що стане основою більш точної оцінки та прогнозування їх ядерної безпеки.

Систему також можна використовувати для вимірювання вигоряння палива у сховищах відпрацьованого ядерного палива.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Уриг Р.* Статистические методы в физике реакторов. - М.: Атомиздат, 1974. - 400 с.
2. *Degweker S.B.* Reactor noise in accelerator driven systems // Annals of Nuclear Energy. - 2003. - Vol. 30. - P. 223 - 243.
3. <http://www.ipc2u.com.kz/catalog/>

**АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЙ НЕЙТРОННЫХ
ПАРАМЕТРОВ ПОДКРИТИЧНЫХ ЯДЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

**Ф. Н. Березин, А. П. Войтер, В. Н. Павлович, В. А. Кисурин, И. А. Мазный,
А. Н. Ковалев, М. И. Доронин, С. А. Стороженко**

Рассмотрено методику и многоканальную измерительную систему нового поколения для определения нейтронных параметров подкритичных ядерных материалов, основанную на прецизионном измерении интервалов времени между сигналами детекторов, что обеспечивает ее инвариантность относительно методов обработки экспериментальных данных.

**AUTOMATIZED MEASURING SYSTEM FOR NEUTRON PARAMETERS
OF THE SUBCRITICAL NUCLEAR MATERIALS**

**F. N. Berezin, A. P. Voiter, V. N. Pavlovich, V. A. Kisurin, I. A. Maznyj,
A. N. Kovalev, M. I. Doronin, S. A. Storozhenko**

Multichannel measuring system of the new generation and the procedure for determining neutron parameters of the subcritical nuclear materials based on the precision determination of time intervals between the neutron detectors' signals and new methods of handling of experimental data is considered.

Надійшла до редакції 04.02.09,
після доопрацювання – 24.03.09.