

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПОМЕХОЗАЩИЩЕННОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КАНАЛА ВРЕМЕНИ РЕГИСТРАЦИИ НЕЙТРОНОВ**

**А. А. Кучмагра, Г. И. Одинокин, В. Б. Шостак**

*Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, Чернобыль*

Приведены описание и результаты лабораторных экспериментов (с использованием плутоний-бериллиевого нейтронного источника) по исследованию помехозащищенности канала измерения времени регистрации нейтронов, используемого при измерениях методами нейтронной шумовой диагностики. Показана эффективность и достаточность примененных схемотехнических способов подавления импульсных помех.

Инструментальная часть статистических методов [1] (еще называемых методами нейтронной шумовой диагностики) определения критических характеристик размножающих нейтроны систем основывается на измерении интервалов времени между регистрируемыми отсчетами нейтронного детектора. Опыт практических измерений временных характеристик нестационарного поля мгновенных нейтронов деления на объекте «Укрытие» и обработка полученных данных по разработанной методике измерения подкритичности статистическими методами [2 – 6] показал, что при регистрации нейтронов и измерении временных интервалов между ними возможные помехи и наводки в элементах измерительного канала приводят к значительным искажениям временных спектров исследуемых сигналов и, в конечном итоге, неправильной оценке определяемых критических характеристик, в частности - константы спада мгновенных нейтронов.

Поэтому авторами была поставлена задача: провести ряд экспериментов в лабораторных условиях для исследования влияния помех на измерительный тракт и конечный результат измерений – временные спектры. Основная цель экспериментальных исследований – выяснить механизмы и пути возникновения и влияния помех различного рода на временные спектры при измерении временных интервалов, а также предложить способы уменьшения этих помех.

### **Состав измерительного канала и описание экспериментов**

В состав измерительного канала входит:

блок детектирования (БД) с двумя камерами деления КНТ-31;

измеритель времени регистрации событий (ИВРС), включающий предварительный импульсный усилитель ПИ-02, блок дискриминаторов, блок питания ( $\pm 24$  В и 250 В), заключенные в общий экранирующий корпус и контроллер ИВРС, установленный в системном блоке компьютера;

для согласования уровней между выходом ПИ-02 и входами блока дискриминаторов включен делитель напряжения 1:10;

цифровой осциллограф Velleman PCS-500 для наблюдения и контроля за формой сигналов.

Все измерения проводились в измерительной лаборатории с использованием нейтронного плутоний-бериллиевого источника типа ИБН-12. Известно, что в отсутствие помех распределение временных интервалов между зарегистрированными детектором нейтронами, испускаемых этим источником должно подчиняться экспоненциальному закону.

БД располагался вблизи источника нейтронов. Сигнал с БД поступает на предусилитель, далее с выхода предусилителя через делитель напряжения параллельно на несколько входов блока дискриминаторов ИВРС, на которых можно установить разные пороги дискриминации.

Для того чтобы можно было сравнивать между собой результаты применения различных аппаратных и схемотехнических методов уменьшения влияния помех, входные каналы ИВРС (8 шт.) были сгруппированы следующим образом:

1-й канал – контрольный. Никаких аппаратных методов не применялось;

2-й канал – в дискриминатор введена положительная обратная связь (гистерезис).

Величина гистерезиса по всем каналам одинакова и составляет  $\Delta U_T \approx (70 \pm 5)$  мВ;

3 – 5-й каналы. Входы включены параллельно и через входной буферный повторитель поданы на соответствующие каналы дискриминаторов. В характеристики дискриминаторов введен гистерезис. На эту группу каналов включен блок подавления помех (БПП);

6 – 8-й каналы. Входы включены параллельно и через входной буферный повторитель поданы на соответствующие каналы дискриминаторов. Переключение дискриминаторов происходит без гистерезиса. На эту группу каналов также включен свой БПП.

Установку (регулировку) уровней дискриминации в каждом входном канале блока дискриминаторов можно производить независимо друг от друга в диапазоне от минус 1,2 В до плюс 1,2 В. При сравнении результатов измерений следует иметь ввиду погрешность от неидентичности установки порогов дискриминации. Погрешность установки порогов дискриминации составляет  $\Delta U_d \approx (\pm 0,01)$  В.

Настройку (установку порога срабатывания) каждого БПП также можно проводить отдельно и независимо от другого. В проводимых экспериментах БПП были настроены одинаково. Порог срабатывания БПП  $U_{БПП}$  устанавливался по средней амплитуде отрицательного выброса импульсов помехи. Было замечено и зафиксировано (примеры осциллограмм реальных сигналов на рис. 1 - 4), что большинство случайных помех имеет вид пачек радиочастотных импульсов, иногда модулированных по амплитуде, симметричных относительно нулевой линии и с периодом следования импульсов в пачке  $T_n = 1,25 \pm 0,50$  мкс. Признаком, отличающим помехи от полезного сигнала, который используется в БПП для селекции помех, как раз и является наличие отрицательного выброса в сигнале. При превышении отрицательным выбросом в момент  $t_0$  установленного в БПП порога происходит временная селекция входного сигнала, т.е. если следующий входной импульс появляется в интервале  $t_0 + \Delta t_c$ , то он интерпретируется как помеха и не регистрируется. Величину  $\Delta t_c$  можно регулировать, выбирается она исходя из значения  $T_n$ . В рассматриваемых экспериментах  $\Delta t_c \approx 2$  мкс,  $U_{БПП} \approx$  минус 65 мВ.

Для накопления статистических данных, необходимых для построения временных спектров, были проведены серии измерений при различных порогах дискриминации (от 0,07 до 0,7 В) с подачей входного сигнала одновременно на рассмотренные группы каналов блока дискриминаторов. Таким образом, сравнивались временные спектры, полученные контрольным измерительным каналом, измерительным каналом с гистерезисом, измерительным каналом с гистерезисом и БПП, измерительным каналом с БПП без гистерезиса. Всего было проведено порядка 20 измерений с суммарным временем измерения около 78 ч.

После анализа дискриминационной характеристики был выбран оптимальный порог дискриминации  $U_d = 0,14$  В. С этим порогом дискриминации дополнительно проведены достаточно длительные измерения ( $T_{изм} = 37$  ч) для минимизации статистической погрешности измерения временных интервалов.

### Результаты экспериментальных исследований

Результатом обработки файлов первичных данных измерений, т.е. времен регистрации событий являются:

временные спектры или зависимость распределения длин интервалов между импульсами по времени;

средняя скорость счета импульсов  $n$ ;

зависимость числа событий (зарегистрированных нейтронов) в интервале времени от длины интервала.

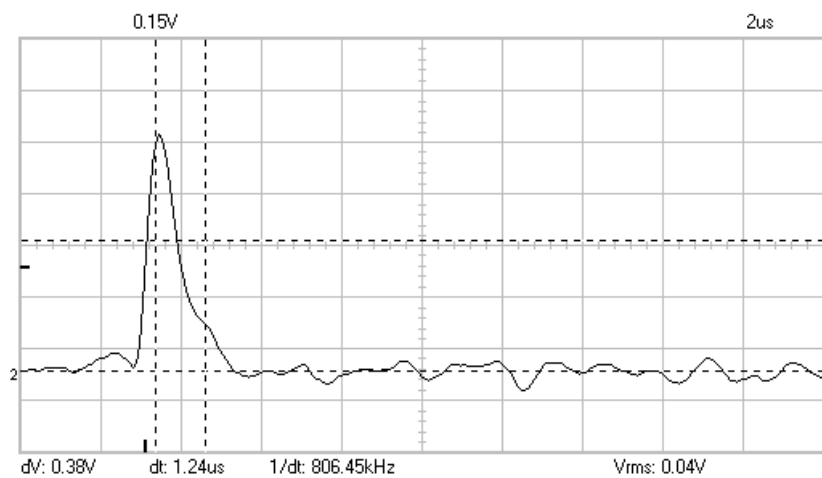


Рис. 1. Пример осциллограммы "нейтронного" импульса.

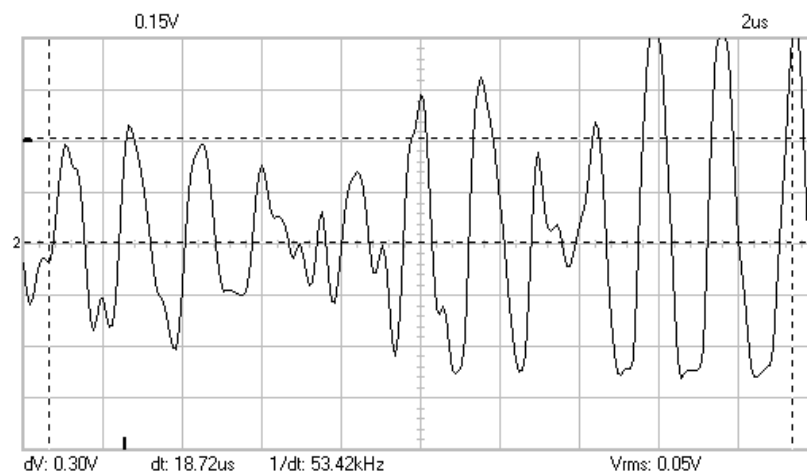


Рис. 3. Пример осциллограммы импульсной помехи.

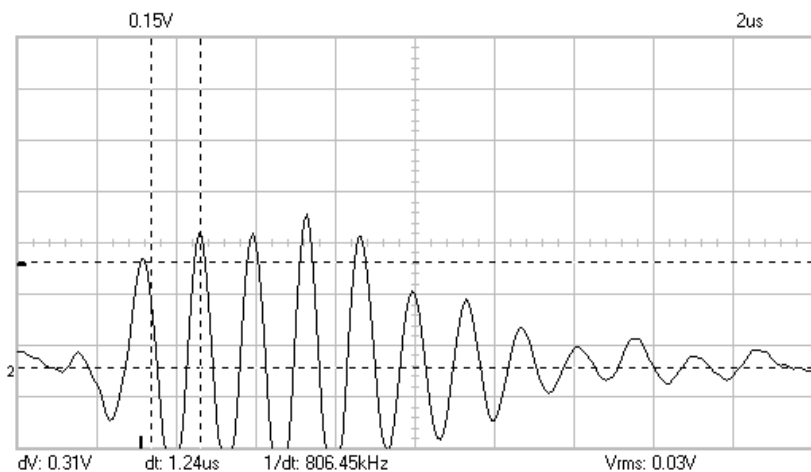


Рис. 2. Пример осциллограммы импульсной помехи.

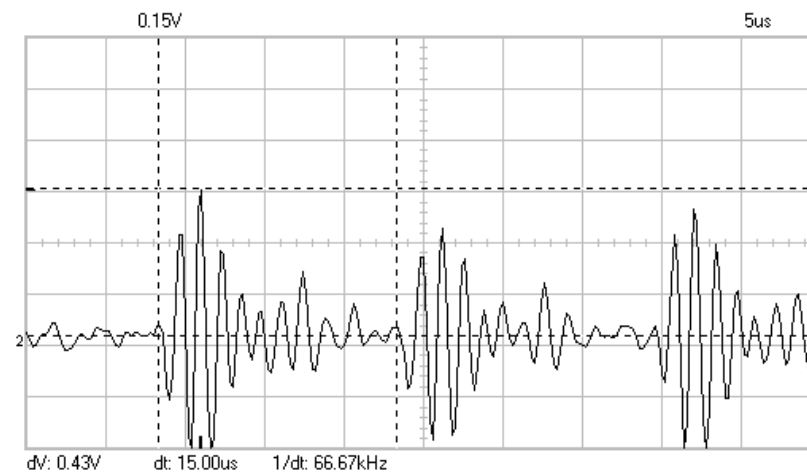


Рис. 4. Пример осциллограммы импульсной помехи.



По результатам экспериментов была построена (рис. 5) дискриминационная характеристика, т.е. зависимость скорости счета от уровня дискриминации. На рисунке приведена также дифференциальная дискриминационная характеристика, которая была получена расчетным путем. Дифференциальная характеристика характеризует амплитудный спектр входного сигнала.

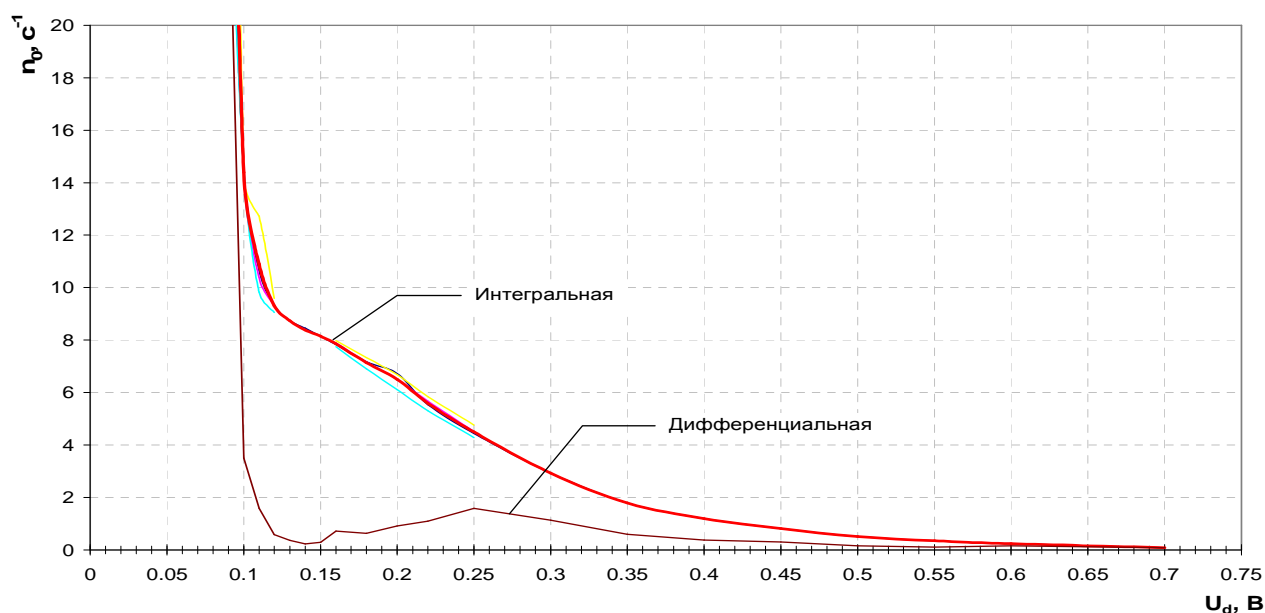


Рис. 5. Дискриминационные характеристики.

Из графика видно, что область шумов измерительного тракта, алфа-тока камеры деления лежит в диапазоне до 0,12 В (реально с учетом делителя напряжения 1,2 В). Для надежной амплитудной селекции шумовых импульсов с одной стороны и обеспечения максимальной эффективности регистрации нейтронов при данных условиях измерений порог дискриминации должен быть  $U_d = 0,14$  В.

Для различных порогов дискриминации были построены временные спектры исследуемых сигналов. Временной спектр представляет собой распределение длительностей интервалов времени между зарегистрированными нейтронами. Временной анализатор спектра в ИВРС виртуальный и организован программно. Временные спектры получают обработкой файлов первичных данных измерений. На рис. 6 даны графики временных спектров для пяти значений порога дискриминации, полученных по 1-му контрольному каналу блока дискриминаторов, т.е. без использования дополнительных аппаратных способов подавления помех.

Для того чтобы можно было сравнивать между собой различные временные спектры, по оси ординат на графиках отложена относительная частота или в пределе, при бесконечно большом времени измерения, вероятность появления интервалов времени определенной длительности, рассчитанная по формуле

$$p_i = \frac{m_i}{N-1},$$

где  $i$  – номер канала временного анализатора спектра;  $m_i$  – количество интервалов времени в  $i$ -м канале временного анализатора, т.е. количество интервалов времени длительности, которых находятся в диапазоне от  $(i-1) \cdot \Delta t$  до  $i \cdot \Delta t$ ;  $N$  – общее число зарегистрированных за время измерения  $T_{\text{изм}}$  нейтронов;  $\Delta t$  – ширина канала временного анализатора. При этом средняя скорость счета импульсов равна  $n = N/T_{\text{изм}}$ . В ИВРС число каналов временного анализатора 2048, а ширину канала  $\Delta t$  можно задавать любую из ряда значений, равных  $(0,25 \cdot 2^k)$  мкс, где  $k = 0, 1, 2, \dots, 20$ .

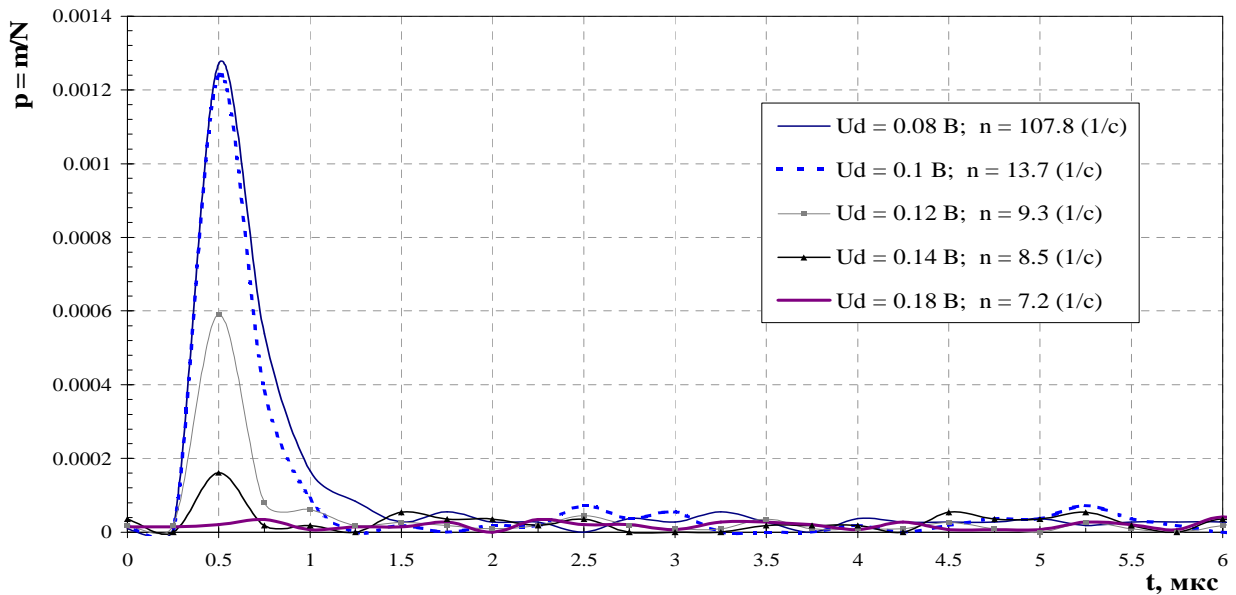


Рис. 6. Временные спектры по контрольному каналу ИВРС.  $\Delta t = 0,25$  мкс.

На спектрах видно, что распределение имеет явно выраженный пик вероятностей в диапазоне длительностей интервалов времени от 0,25 до 1,00 мкс. Это означает, что вероятность того, что временной интервал между двумя регистрируемыми ИВРС импульсами лежит в диапазоне от 0,25 до 1,00 мкс значительно превышает соответствующую вероятность, если бы регистрируемые импульсы были распределены по закону Пуассона. С увеличением порога дискриминации величина пика уменьшается и при  $U_d \geq 0,18$  В пропадает совсем. Очевидно, что в указанном диапазоне интервалов времени аппаратурой регистрируются дополнительные по отношению к регистрируемым нейтронам импульсы помех. Следует отметить, что относительный вклад ложных импульсов от общего числа зарегистрированных импульсов даже при  $U_d = 0,08$  В не превышает 0,2 %, а при рабочем пороге дискриминации  $U_d = 0,14$  В не превышает 0,02 %. Поэтому это не приводит к значительной ошибке при определении средней скорости счета импульсов, хотя значительно искажает распределение временных интервалов.

После подробного анализа осциллограмм сигналов была определена причина этого явления. Импульсы электронных шумов, помех, альфа-тока камеры деления с амплитудой меньшей, чем порог дискриминации, могут суммироваться по амплитуде на спаде импульса полезного сигнала. В результате форма суммарного импульса получается искаженной с двумя или несколькими пиками. Если фронт второго и последующих пиков пересекает порог дискриминации, то происходит регистрация дополнительных ложных сигналов. Очевидно, что интервалы времени от сдвоенных, строенных и т.д. импульсов имеют малые длительности и в области малых времен искажают ожидаемое распределение интервалов времени. Примеры осциллограмм с наложением импульсов приведены на рис. 7 и 8. Для устранения этого явления в дискриминаторы была введена дополнительная глубокая положительная обратная связь, т.е. в характеристики переключения дискриминаторов введен гистерезис  $\Delta U_2 \approx (70 \pm 5)$  мВ.

На рис. 9 представлены временные спектры того же сигнала, что и на рис. 6, но полученные по 2-му каналу ИВРС, где был дискриминатор с гистерезисом. Из графиков видно, что пики в распределении полностью исчезли. При сравнении графиков следует учесть, что максимальный масштаб по оси ординат на рис. 9 соответствует одному делению по оси ординат на рис. 6.

Как уже отмечалось, было проведено несколько серий измерений. В нескольких экспозициях помимо помех, описанных выше, были дополнительно зарегистрированы слу-

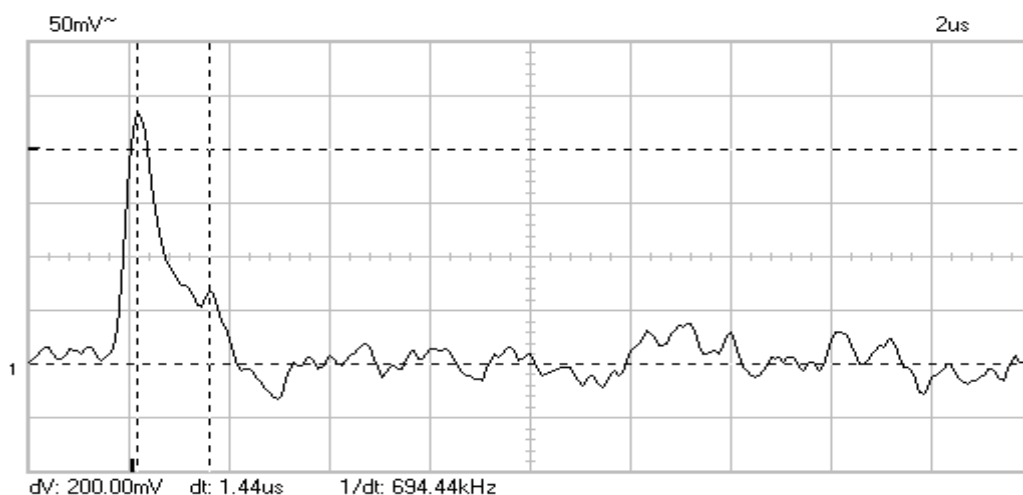


Рис. 7. Пример осциллограммы сигнала с наложением амплитуд на спаде импульса.

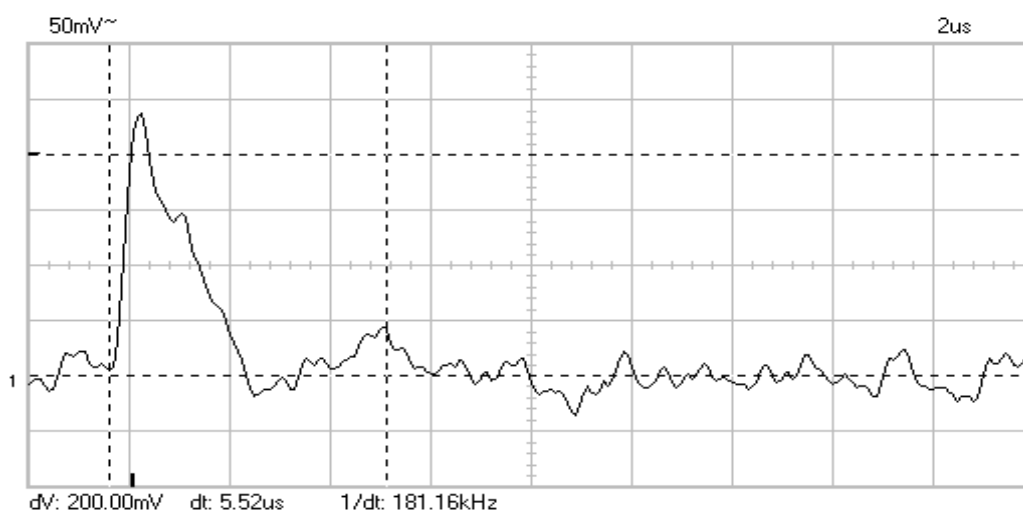


Рис. 8. Пример осциллограммы сигнала с наложением амплитуд на спаде импульса.

чайные импульсные помехи аналогичного вида, показанные на рис. 2 - 4. Временные спектры для этих случаев для разных порогов дискриминации, полученные по контрольному входу ИВРС и по входам с гистерезисом и БПП, приведены на рис. 10 и 11. Для сравнения на рис. 10 штриховой линией показан тот же временной спектр, что и на рис. 6 (тоже штриховой линией) с помехой только от наложения импульсов.

Анализируя представленные спектры, видно, что относительный вклад помех подобного вида значительно больше, чем помех от наложения импульсов и, очевидно, он зависит от интенсивности источника помех. Также видно, что происходит амплитудная селекция импульсов помех с увеличением порога дискриминации. Наличие гистерезиса в характеристике дискриминаторов устраняет только влияние помех от наложения импульсов. А способ временной селекции импульсов, примененный в БПП практически полностью (см. графики спектров на рис. 11) устраняет влияние (пики вероятностей на временном спектре) импульсных случайных помех с оговоркой, что БПП был настроен на средние параметры (период, амплитуда импульсов) зафиксированного типа помех.

Работу БПП иллюстрируют осциллограммы сигналов, представленных на рис. 12–14. На рис. 12 зафиксированы сигнал помехи в виде пачки импульсов и сигнал с выхода контрольного канала блока дискриминаторов (на рисунке – верхняя осциллограмма). Порог дискриминации  $U_d = 0,14$  В соответствует штриховой линии на рисунке. Видно, что в данном случае были ложно зафиксированы серии пачек импульсов с интервалом между импульсами

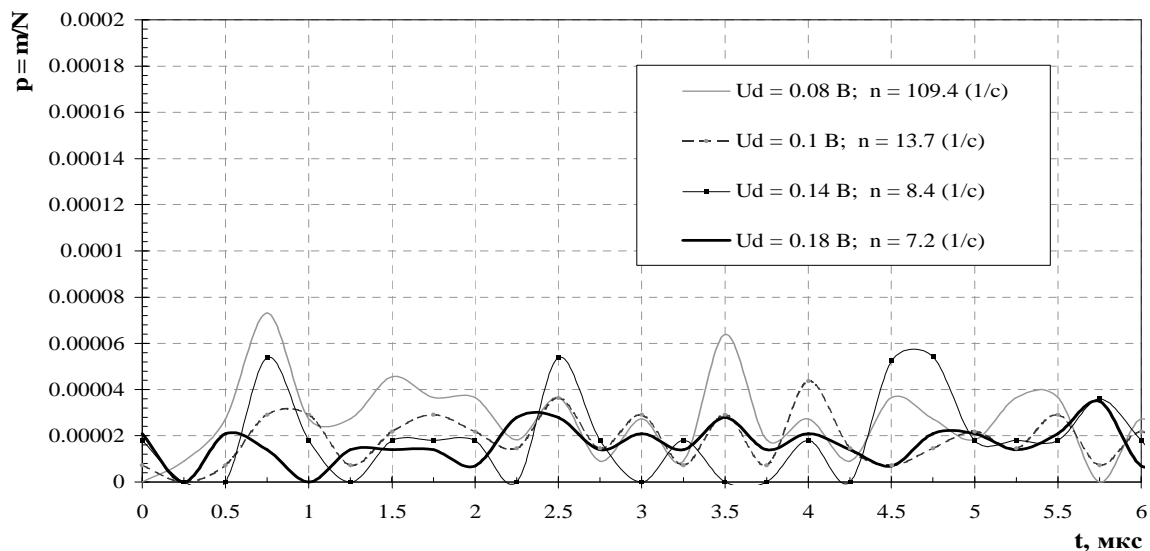


Рис. 9. Временные спектры по каналу ИВРС с гистерезисом.  $\Delta t = 0,25$  мкс.

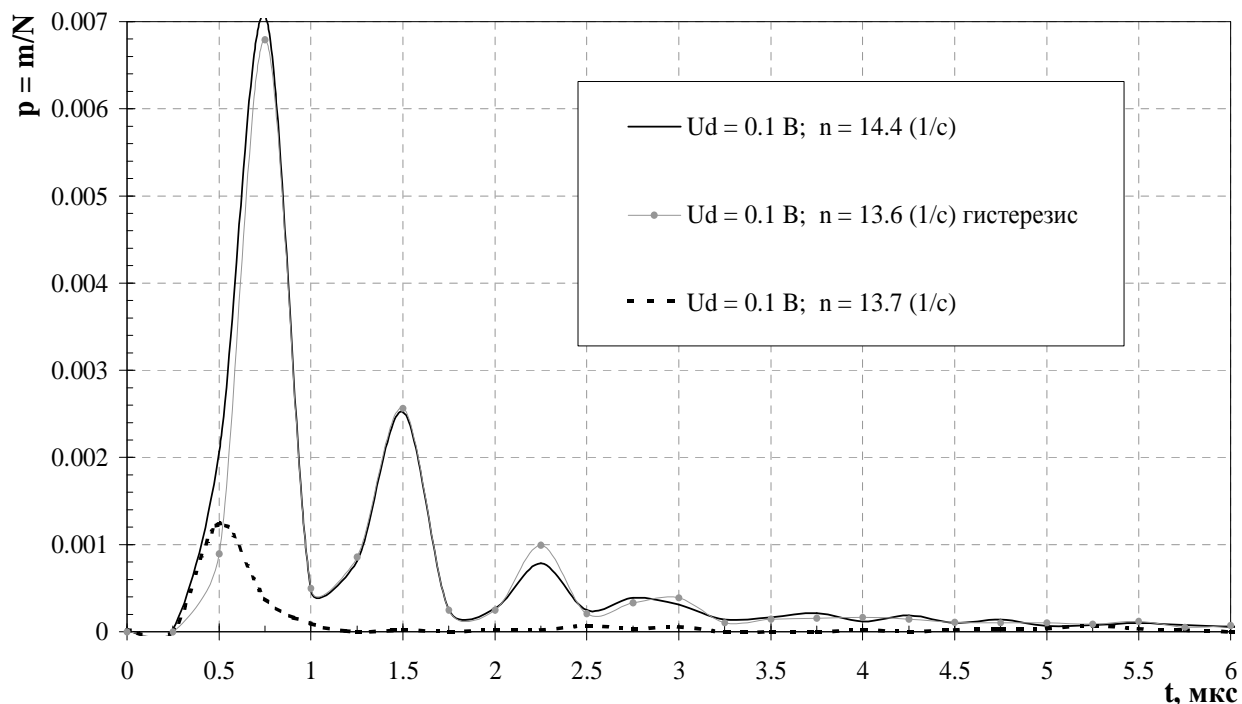


Рис. 10. Временные спектры,  $U_d = 0,1$  В,  $\Delta t = 0,25$  мкс.

примерно 0,9 мкс. На рис. 13 дискриминатор с БПП ложно зарегистрировал только первые из серии импульсы помехи. Это является погрешностью примененного в БПП метода временной селекции импульсов: если пачка импульсов помехи начинается с положительного импульса и его амплитуда превышает порог дискриминации, то он регистрируется. На рис. 14 показан пример полной фильтрации импульсной помехи.

Для уменьшения статистического разброса при определении временных спектров при относительно невысокой средней скорости счета импульсов необходимо увеличивать время измерения, при этом относительная погрешность уменьшается в  $\sqrt{n \cdot T}$  раз. Для этой цели была проведена серия из 11 измерений. Суммарное время измерения составило  $T_{\Sigma \text{изм}} = 134976$  с. На рис. 15 и 16 точками показаны временные спектры, полученные по каж-



дой отдельной экспозиции (измерении) входной последовательности импульсов, а сплошной линией – суммарный спектр. В трех экспозициях из проведенной серии была зафиксирована случайная импульсная помеха, что видно по форме спектра на рис. 15. В канале с БПП и гистерезисом эта помеха была полностью отфильтрована (см. рис. 16).

Результаты каждого из примененных методов борьбы с помехами и их комбинации на примере суммарного временного спектра проиллюстрировано на рис. 17. Видно, что сочетание БПП и гистерезиса в дискриминаторе полностью устранило ("вырезало") влияние помехи на временной спектр.

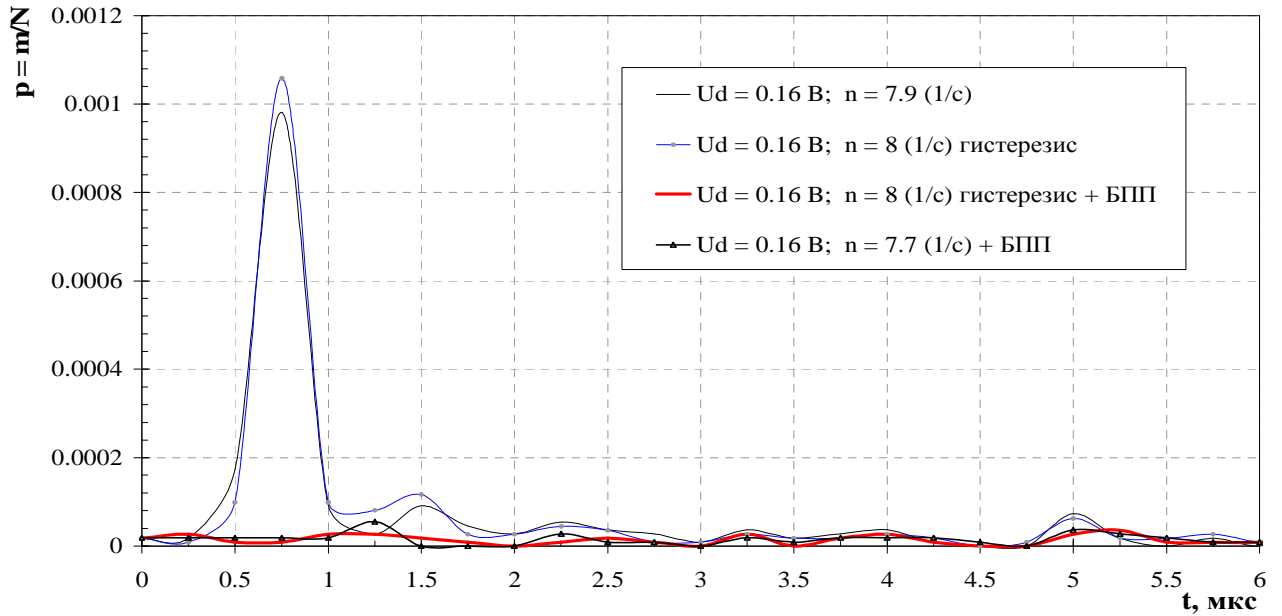


Рис. 11. Временные спектры,  $U_d = 0,16$  В,  $\Delta t = 0,25$  мкс.

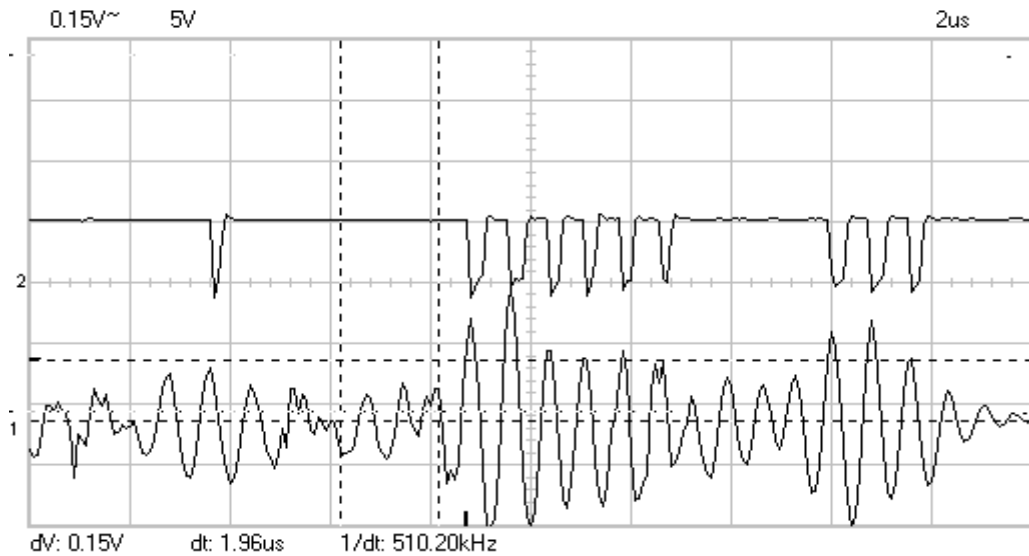


Рис. 12. Пример осциллограммы сигнала импульсной помехи и сигнала с выхода контрольного канала блока дискриминаторов.

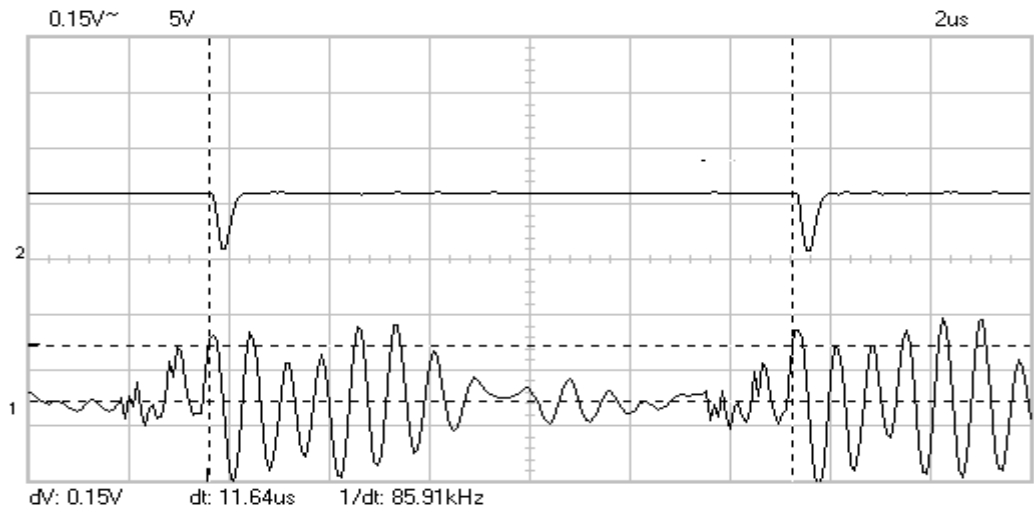


Рис. 13. Пример осциллограммы сигнала импульсной помехи и сигнала с выхода канала блока дискриминаторов с БПП. Регистрация двух импульсов помехи.

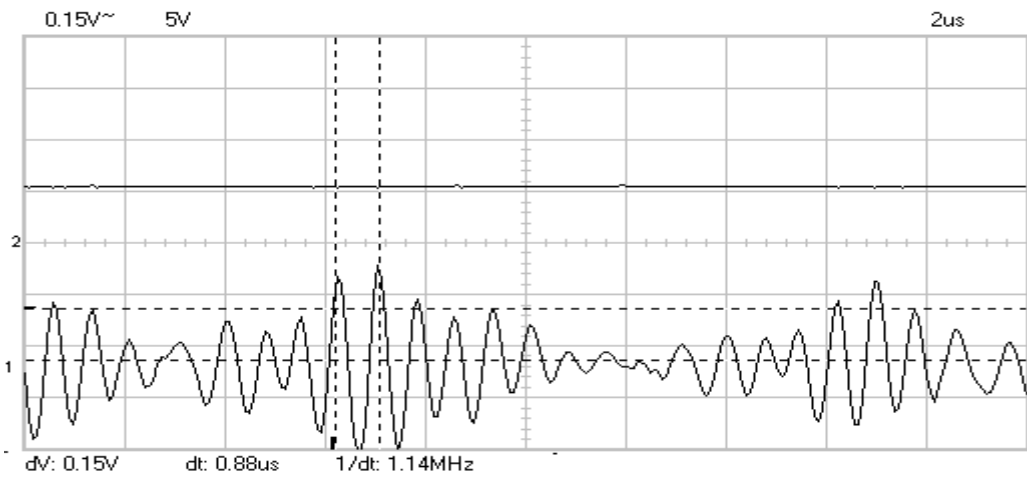


Рис. 14. Пример осциллограммы сигнала импульсной помехи и сигнала с выхода канала блока дискриминаторов с БПП.

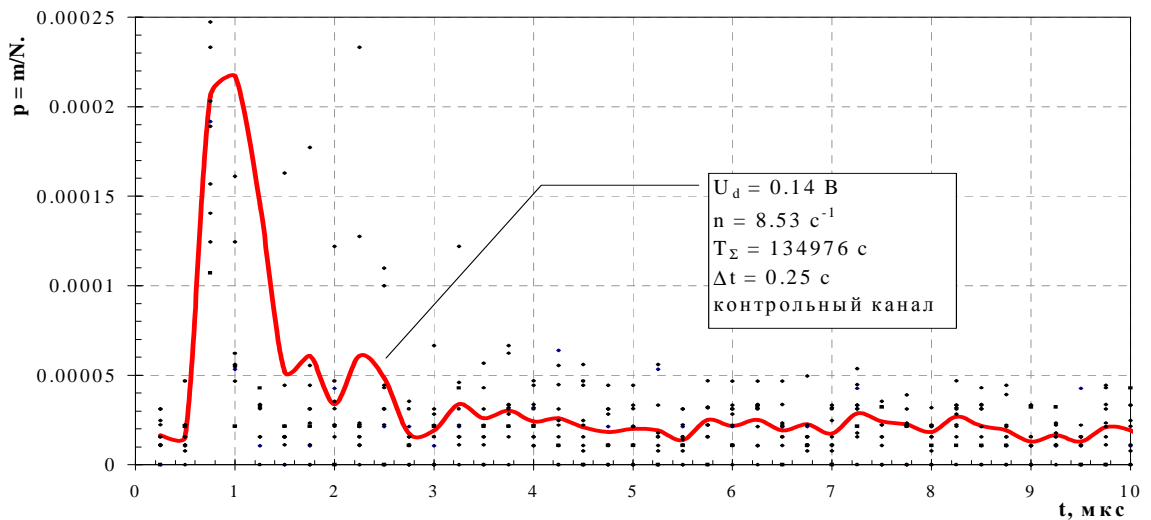


Рис. 15. Суммарный временной спектр. Контрольный канал блока дискриминаторов.

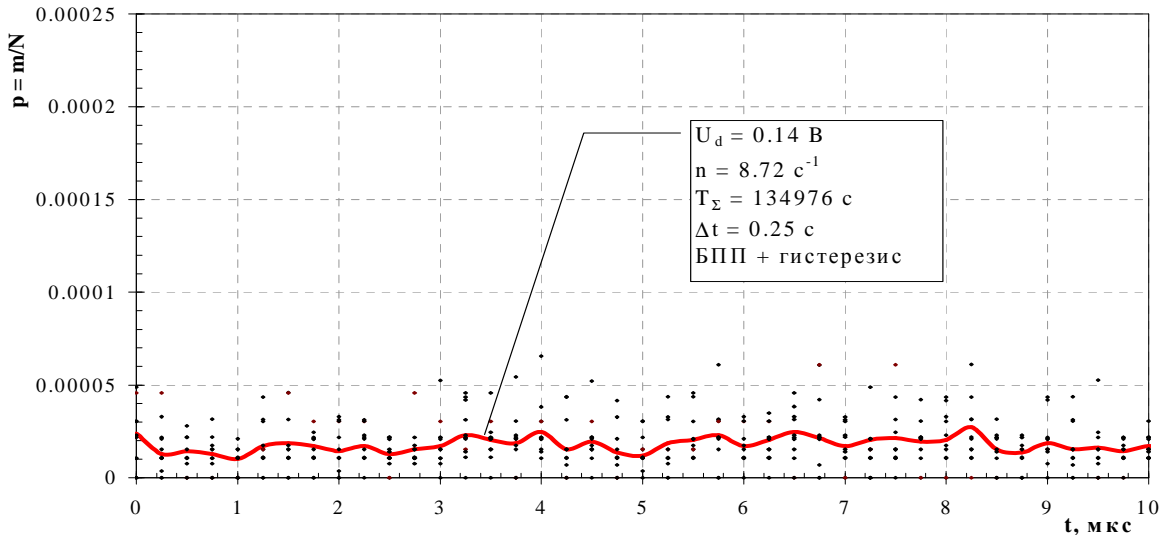


Рис. 16. Суммарный временной спектр отфильтрованного от помех сигнала.

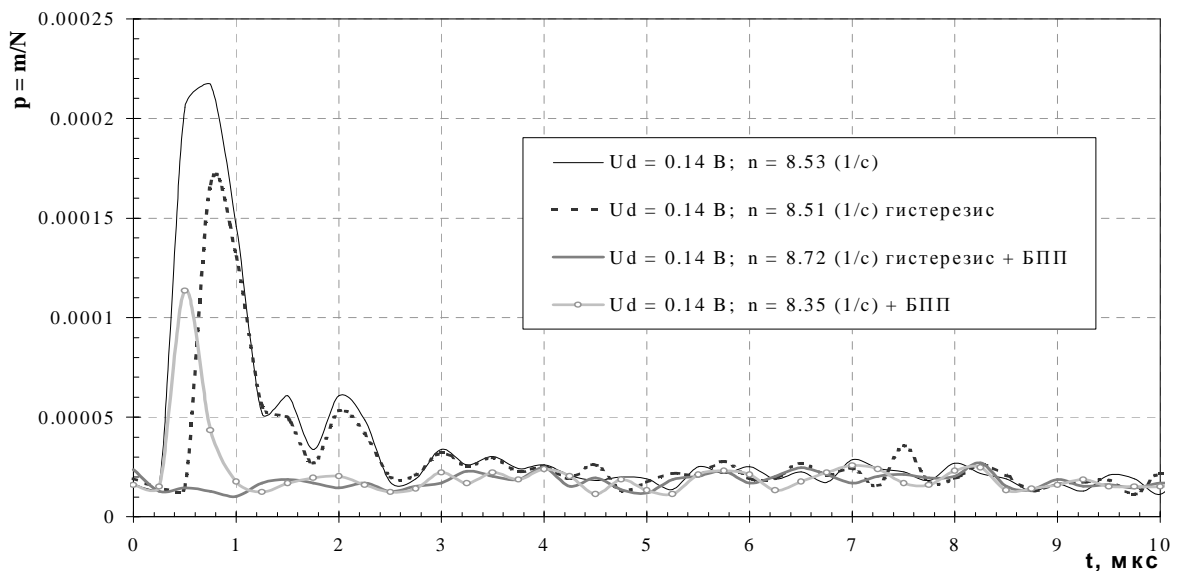


Рис. 17. Иллюстрация действия методов фильтрации помех.

### Выводы

По результатам анализа проведенных экспериментальных лабораторных исследований нейтронного измерительного канала и аппаратуры измерения времени регистрации событий можно сделать следующие выводы:

выявлено два типа помех, которые приводят к значительному искажению распределения временных интервалов при измерении времени регистрации событий;

помеха первого типа – от наложения импульсов приводит к искажению временных спектров в узком диапазоне времен в общем случае равном длительности формируемого "нейтронного" импульса. Введение в характеристику переключения дискриминаторов гистерезиса достаточно эффективно устраняет влияние этой помехи;

искажения распределения временных интервалов от воздействия случайной импульсной помехи зависит от интенсивности и частотного спектра помехи. Для фильтрации этого типа помех необходимо помимо амплитудной селекции импульсов применять также временную селекцию импульсов;

использованная в БПП схемотехническая реализация метода временной селекции импульсов показала свою эффективность в подавлении импульсных помех.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Уриг Р. Статистические методы в физике ядерных реакторов / Пер. с англ. - М.: Атомиздат, 1974. - С. 31 – 33.
2. Ключников А. А., Кучмагра А. А., Олейник Е.Е. и др. Разработка методики измерения эффективного коэффициента размножения скоплений топливосодержащих материалов на основе методов шумовой диагностики // Проблемы Чернобиля. - 2002. - Вип. 12. - С. 154.
3. Ключников А. А., Кучмагра А. А., Котляров В. Т. и др. Адаптация методики статистических измерений подкритичности к условиям объекта "Укрытие" // Там же. - 2002. - Вип. 13. - С. 33.
4. Венедиктов В.М., Ключников А.А., Котляров В.Т. и др. Разработка проекта методики измерения  $K_{эф}$  и динамики поведения подкритичности ТСМ на основе методов шумовой диагностики. Адаптация разработок проекта к условиям ОУ: (Заключит. отчет о НИР). - Арх. № 3889. - Чернобыль. 2003. – 70 с.
5. Ключников А. А., Олейник Е. Е., Кучмагра А. А. и др. Статистические измерения подкритичности в условиях объекта "Укрытие" // Проблемы Чернобиля. - 2004. - Вип. 14. - С. 81.
6. Ключников А. А., Кучмагра А. А., Одинокин Г.И. и др. Статистические измерения константы спада мгновенных нейтронов в хранилище отработанного ядерного топлива // Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чернобиля. - 2004. - Вип. 1. - С. 118.
7. Ключников А. А., Котляров В.Т., Кучмагра А. А. и др. Анализ результатов статистических измерений эффективного коэффициента размножения нейтронов в хранилище отработанного ядерного топлива // Там же. - 2006. - Вип. 4. - С. 22.

Поступила в редакцию 26.12.05

**21 ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРешКОДОЗАХИСНОЇ ВИМІРЮВАЛЬНОГО КАНАЛУ ЧАСУ РЕЄСТРАЦІЇ НЕЙТРОНІВ****О. А. Кучмагра, Г. І. Одинокін, В. Б. Шостак**

Наведено опис і результати лабораторних експериментів (із використанням плутоній-берилієвого нейтронного джерела) по дослідженню перешкодозахисної каналу вимірювання часу реєстрації нейтронів, що застосовувався при вимірюваннях методами нейтронної шумової діагностики. Показано ефективність і достатність застосованих схемотехнічних способів придушення імпульсних перешкод.

**21 RESEARCH OF ANTIJAMMING OF MEASURING CHANNEL OF TIME OF REGISTRATION OF NEUTRONS****A. A. Kuchmagra, G. I. Odinokin, V. B. Shostak**

Description and results of laboratory experiments (with the use of the Pu-Be neutron source) on research of antijamming of channel of measuring of time of registration of neutrons is resulted, used for measurings by the methods of neutron noise diagnostics. Efficiency and sufficient of the applied methods of suppression of impulsive hindrances is shown.

