

На правах рукописи

НЕСТЕРЕНКО ВЛАДИМИР СЕМЕНОВИЧ

**Методы повышения точности
временных измерений
в спектрометрии нейтронов
с энергиями 0,1—20 МэВ**

**Специальность: 05.11.10 — приборы для измерения
ионизирующих излучений и рентгеновские приборы**

*Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук*

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Исследования механизмов взаимодействия нейтронов с энергиями 0,1-20 Мэв с веществом является одной из важнейших задач, направленной на получение более точных количественных данных, требующихся в ядерной энергетике. Изучение свойств атомного ядра связано с исследованием детальной структуры уровней возбуждения, что требует непрерывного совершенствования экспериментальных методов и технических измерительных средств. Создание измерительной аппаратуры, обеспечивающей растущие потребности физического эксперимента, и дальнейшее её совершенствование на основе новых технических решений с использованием современной элементной базы, является весьма актуальной задачей.

Постояние вопроса. К настоящему времени как у нас в стране, так и на рубежом появилось большое количество работ, посвященных методам построения устройств измерения временных интервалов и улучшения их параметров. Применение этих методов в области ядерного приборостроения позволило получить результаты, которые, в общих чертах, сводятся к следующему.

Достигнуты такие значения отдельных параметров измерительной аппаратуры, которые намного опережают потребности спектрометрии нейтронов. Так, достигнуты ширины каналов в единицы пикосекунд, стабильность 10^{-6} - 10^{-7} , линейность 0,1-0,2%, быстродействие 10^5 - 10^6 событий/сек.

На базе физических установок созданы нейтронные спектрометры, которые обслуживаются электронным оборудованием, построенным по известным методам и решающим требуемые измерительные характеристики.

Проведены многочисленные физические эксперименты, которые позволили определить относительные достоинства и недостатки методов построения измерительных средств, направление их развития. Важнейшую роль сыграло появление и внедрение международного стандарта SAMAS, определившего место измерительных средств в архитектуре систем сбора и обработки данных.

Однако, несмотря на внешнюю завершенность проблем, связанных с методами построения и структуры современных измерительных средств, существует много внутренних проблем, которые обусловлены следующими основными причинами.

Работа выполнена в орден Трудового Красного Знамени Финанко-энергетическом институте, г. Обнинск.

Научный руководитель — кандидат технических наук
Чубаров Сергей Иванович.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Штрах И. В.
кандидат технических наук, старший научный сотрудник Жуков Г. П.

Ведущая организация — Институт атомной энергии им. И. В. Курчатова, г. Москва.

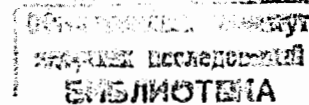
Защита состоится «6» марта 1980 г. в 15³⁰ час.
на заседании специализированного совета Д.047.01.05 при Лаборатории нейтронной физики и Лаборатории ядерных реакций Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан «29» . . . 07. . . . 1980 г.

Ученый секретарь
специализированного совета


Ю. В. ТАРАН.



Современный физический эксперимент проводится с привлечением большого количества сложного и дорогостоящего оборудования, поэтому проблемы технического обеспечения и экономической эффективности оказываются неразрывно связанными друг с другом. Выбор методов построения измерительной аппаратуры и, соответственно, технических параметров измерительных средств должен быть строго согласован с потребностями конкретного эксперимента.

Равнообразие физических экспериментов с точки зрения методов постановки приводит к тому, что каждый физический эксперимент специфичен и с точки зрения аппаратного обеспечения. Как следствие, современный физический эксперимент далеко не всегда может быть оборудован измерительной аппаратурой промышленного производства, доля заказного оборудования остается большой.

Автоматизация физических исследований, как средство повышения экономической эффективности, приводит к переоценке методов построения измерительных устройств, поскольку гибкость управления измерительными параметрами становится одним из важнейших критериев сравнения измерительных средств.

Современная ядерная электроника в части измерительных средств на настоящем этапе совершенствуется в рамках известных методов за счет схемотехнических и технологических ресурсов, причем эти ресурсы далеко еще не кочерпаны.

Теоретические исследования вопросов, связанных с точностью временных измерений, направлены главным образом на определение предельных метрологических параметров конкретных измерительных устройств и методов, а также условий их реализации. Однако, несмотря на исключительную ценность результатов таких исследований, они не дают ответа на два важнейших вопроса: в каком отношении находятся эти параметры с теми, которые требуются в конкретном физическом эксперименте, и возможна ли коррекция различных ошибок спектрометрического тракта, как альтернатива минимизации этих ошибок. Помимо этого, ряд вопросов нуждается в дальнейшей, более детальной проработке с целью получения более точных и удобных аналитических выражений.

Цель работы заключается в создании измерительной аппаратуры для спектрометрии нейтронов с энергиями 0,1-20 МэВ на ускорительном комплексе СЭИ с теоретически обоснованными измерительными характеристиками. Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи.

1. Теоретически исследовать влияние различных ошибок измерительного тракта на точность оценки исследуемых параметров физических процессов для согласования измерительных характеристик с потребностями подклассных физических экспериментов и для определения возможности коррекции ошибок.

2. Теоретически исследовать вопросы количественной оценки эффективности различных методов улучшения измерительных характеристик спектрометрической аппаратуры.

3. Исследовать возможности улучшения измерительных параметров временных АЩ, построенных по методу двучинового возбуждения и статистического кодирования.

4. Разработать и внедрить в эксперимент комплекс устройств для временного анализа, включающий устройства общего назначения (устройства обработки сигналов в аналоговой форме и отбора полезных событий, временные АЩ) и специализированные устройства.

Научная повязка работы.

1. Для строгого математического обоснования возможностей и условий коррекции заданного типа ошибки получения аналитические выражения, связывающие входное и выходное распределение устройства, определяющего источник этой ошибки; эти аналитические выражения позволяют получить алгоритм коррекции и условия его реализации; наиболее ценными представляются формулы для показаний спектров на счет пророчотой и расчета ошибки дискретизации для ограниченных временных спектров.

2. Для определения важнейших измерительных характеристик спектрометрического тракта с учетом потребностей конкретного эксперимента получены зависимости точности оценки неизвестного параметра распределения от ошибок, связанных с конечным разрешением, наличием шума, нестабильностью и просчетами событий; эти зависимости позволяют согласовать технические характеристики измерительных устройств спектрометра с потребностями конкретного эксперимента и определить соотношение аппаратных и программных средств коррекции ошибок.

3. Изучение известного метода анализа статистических процессов в опциллиационном детекторе - полной статистической модели - позволило развить её применение для дальнейшего изучения проблемы точности временной привязки детектируемого события по выходному импульсу детектора, а именно, применением линейных опера-

ций к корреляционной функции получить дополнительные сведения о поведении центра тяжести выходного сигнала, а разложением дисперсии числа электронов, собранных на аноде ФЭУ к заданному моменту времени, оценить вклады в флуктуации центра тяжести различных статистических составляющих.

4. Предложена методика расчета эффективности известных методов статистического усреднения ширины каналов АЦП, которая основана на применении теории случайных функций и линейных фильтров и описании механизмов усреднения; показано, что эффективность каждого из двух рассмотренных методов зависит от способа построения АЦП.

5. Для увеличения быстродействия предложено применение метода двоичного взвешивания и преобразованию временного интервала в цифровой код и оценены его возможности; для реализации преимуществ цифровых методов преобразования предложен и проанализирован метод статистического кодирования.

Практическая ценность. На основе проведенного анализа выработаны рекомендации по проектированию узлов спектрометрической аппаратуры для спектрометрии нейтронов по времени пролета на ускорительном комплексе ФЭМ.

Разработаны практические схемы временных АЦП с характеристиками, отвечающими потребностям проводимых экспериментов, схемы устройств аналоговой обработки сигналов - быстрые дискриминаторы, схемы совпадений, а также схемы устройств специального назначения.

Реализация результатов работы. Разработанные схемы различных узлов временных спектрометров составили основу измерительной аппаратуры спектрометров нейтронов, созданных на ускорителях КТ-0,3 и ЭПН-10М, обслуживаемых физическим измерительным центром ФЭМ, приняты как АСУ ТП в промышленную эксплуатацию.

Апробация работы и публикации. Результаты работы докладывались и обсуждались на научных семинарах в ФЭМ и других организациях. По теме диссертационной работы опубликованы 11 статей, 17 препринтов, 8 докладов на всесоюзных и международных конференциях, 7 отчетов ФЭМ, кроме того, материалы диссертационной работы содержатся в книге "Электронные методы ядерной физики".

Объем работы. Диссертация изложена на 148 страницах машинописного текста, иллюстрируется на 14 страницах рисунками, состо-

ит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы на 112 наименований и 4 приложений на 9 страницах.

Автор защищает.

1. Результаты теоретического анализа влияния ошибок спектрометрического тракта на форму временных спектров, позволяющие определить условия и способы коррекции результатов измерений или минимизации влияния ошибок.

2. Результаты теоретического анализа влияния ошибок спектрометрического тракта на точность оценки неизвестного параметра распределения, позволяющие сформулировать требования к измерительным характеристикам отдельных узлов спектрометра в соответствии с потребностями эксперимента, а также определить соотношение аппаратурных и программных средств коррекции ошибок.

3. Структурные схемы построения преобразователей время-цифровой код на основе методов статистического кодирования и двоичного взвешивания.

4. Методику расчета эффективности улучшения дифференциальной линейности преобразования время-цифровой код путем статистического усреднения ширины каналов в зависимости от способа усреднения и типа кодирующего механизма.

5. Практические схемы узлов спектрометрического тракта, позволившие обеспечить проведение временных измерений в наносекундном диапазоне с высокими техническими характеристиками.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведено обоснование актуальности темы диссертации и сформулированы основные задачи исследования.

Глава I посвящена ошибкам временных измерений и их влиянию на точность определения исследуемых параметров. Рассматриваются следующие источники ошибок спектрометрического тракта:

- ошибка во временной привязке детектируемых событий и выходных сигналов, определяющих границы измеряемого временного интервала; источник этой ошибки, случайной по характеру, считается сосредоточенным только в детекторе излучений, где учитываются все случайные ошибки спектрометрического тракта;

- нелинейность преобразования временной интервал-цифровой код; источник этой ошибки связывается с частью преобразователя, названной трансформатором временных интервалов (ТВИ) и отображен в поведении его выходной характеристики;

- ошибка дискретизации представлена источником, связанным с кодирующим механизмом преобразователя; эта ошибка сопряжена с неоднозначностью связи непрерывного входного распределения случайной переменной и дискретного распределения вероятностей на выходе кодирующего узла; при этом полагается, что кодирующий механизм идеально задает эквидистантные границы интегрирования;

- ошибка, связанная с просчетами событий при регистрации одного события из пачки; источник этой ошибки отображен в блокировке входа преобразователя на время обработки и регистрации принятого события.

Возможность коррекции ошибок устанавливается путем отыскания функциональной связи входного и выходного распределения узла, содержащего источник данного вида ошибки. Условия существования этой функциональной связи и практическая реализуемость этих условий являются критерием возможности коррекции. Так, найдено, что для ошибки, связанной с детектором излучений, условия практически не реализуемы, что дает основание считать эту ошибку некорректируемой. Ошибка дискретизации также некорректируема, если об исследуемом распределении нет исчерпывающей априорной информации. В работе рассмотрен случай, когда априорная информация заключена в предположении об ограниченности частотного спектра исследуемого распределения, рассматриваемого как функция времени. В этом случае единственным источником ошибки становится ограниченность во времени исследуемого распределения. Показано, что при выборе шага дискретизации (ширины канала) в соответствии с заданной граничной частотой спектра дисперсия максимальна на краях диапазона и составляет $\leq 0,1D$, где D - дисперсия выборки. При уменьшении вдвое ширины канала дисперсия становится $\leq 0,3D/N$, где N - число каналов, на которое разбит измеряемый диапазон в соответствии с теоремой Котельникова.

В работе приведены соображения по выбору граничной частоты при известном разрешении спектрометра.

Ошибки, связанные с нелинейностью преобразования и просчетами событий, отнесены к корректируемым ошибкам.

Условием коррекции нелинейности является знание выходного распределения ТВИ $P_0(t')$ при равномерном распределении на его входе, что практически легко осуществимо. Тогда входное и выходное распределения связаны соотношением:

$$P(t') = f\left[T \int_{T_0}^t P_0(z) dz\right] P_0(t') T$$

где T - измеряемый диапазон,

$P(t')$ - выходное распределение

$f(t)$ - входное распределение.

Условием коррекции искажений спектра за счет просчетов является знание распределения конца блокировки в измеряемом диапазоне времен. Входное $f(t)$, выходное $P_{\text{вых}}(t)$ и распределение конца блокировки $P_{\text{ок}}(t)$ в интервале T связаны соотношением

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{P_{\text{вых}}(t)}{f(t)} \right] = \nu [P_{\text{ок}}(t) - P_{\text{вых}}(t)]$$

где ν - среднее число событий за период T .

Эта формула указывает на возможность коррекции просчетов аппаратным путем, если обеспечивается равенство $P_{\text{ок}}(t) = f(t)$. Этот режим известен под названием режима равной экспозиции. В реальных условиях точность измерений подтверждена влиянием ошибки, связанной с конечной статистикой отсчетов. Используя метод "аксимального правдоподобия", находим ошибку в оценке неизвестного параметра α исследуемого распределения $f(t, \alpha)$ по формуле:

$$\sigma_{\alpha}^2 = 1/N\Phi$$

где N - суммарное число отсчетов в спектре.

$\Phi = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{(df/d\alpha)^2}{f} dt$ - информация о параметре α , содержащаяся в исследуемом распределении $f(t, \alpha)$. Ошибки, связанные с различными узлами спектрометрического тракта, приводят к искажению распределения $f(t, \alpha)$ и, следовательно, к изменению точности оценки параметра.

Влияния случайной ошибки, связанной с детектором, определим в предположении, что её распределение подчиняется нормальному закону с известной дисперсией σ^2 и не зависит от параметра α . В работе показано, что в этом случае ошибка в оценке σ_{α}^2 неизвестного параметра α будет:

$$\sigma_{\alpha}^2 = \sigma_{\alpha}^2 (1 + \sigma^2 \frac{W}{\Phi})$$

$$\text{где } W_{\alpha} = \int_{-\infty}^{\infty} f(t, \alpha) \left[\frac{d}{dt} \frac{df/d\alpha}{f} \right]^2 dt$$

Влияние нелинейности и неустойчивости ТВМ определяется по следующим формулам:

$$\sigma_2^2 \approx \sigma_0^2 (1 + 2\delta^2)$$

$$\sigma_3^2 \approx \sigma_0^2 (1 + \xi^2)$$

где $\delta^2 = T \int_0^T [P_s(t) - \frac{1}{T}]^2 dt$ - среднеквадратическая оценка дифференциальной нелинейности по результатам измерения $P_s(t)$ равномерного входного распределения I/T ;

ξ - мера неустойчивости, определяемая отношением величины дрейфа пика от фиксированного по длительности входного интервала к величине этой длительности.

Широкие возможности минимизации ошибки дискретизации, достигаемые надлежащим выбором ширины канала и размещением полезной части спектра в области малых значений ошибки, позволяют пренебречь её влиянием на точность оценки параметра.

Влияние просчетов рассматривается для случая распределения конца блокировки в виде δ -функции; т.е. $P_{ra}(t) = \delta(t)$. Тогда значение информации Φ_s изменится и будет:

$$\Phi_s = \int_0^T \frac{(df/d\alpha)^2}{f} \frac{v e^{-v} \int_0^t f dt}{1 - e^{-v}} dt$$

Это позволяет найти σ_2^2 - ошибку в точности оценки параметра α , связанную с просчётами событий.

В работе показано также, как изменяется информация при наличии некоррелированного фона.

Суммарная ошибка в оценке параметра σ_{α}^2 будет равна сумме:

$$\sigma_{\alpha}^2 = \sigma_0^2 + \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \sigma_4^2$$

Задавшись условием

$$\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \sigma_4^2 \ll \sigma_0^2$$

можно определить требования к измерительным характеристикам различных узлов спектрометра в соответствии с требованиями конкретного эксперимента.

В главе II рассмотрены вопросы точности получения временной информации с детекторов излучений. Приведен обзор трех основных математических моделей, используемых для анализа статистических

свойств сцинтилляционных сигналов и получения количественных характеристик точности извлечения временной информации. В основе одной из них, названной полной статистической моделью, лежит определение совместной вероятности $P_0(n_1, t_1; n_2, t_2)$ появления на аноде ФЭУ n_1 электронов к моменту t_1 и n_2 электронов к моменту t_2 . Производящая функция этой вероятности $\Phi_0(r_1, t_1; s, t_2)$ позволяет получить точное выражение для дисперсии $D(t)$ числа электронов, собранных на аноде к моменту t , найти корреляционную функцию $K_N(t_1, t_2)$ для случайной функции $N(t)$ - числа электронов, собранных к моменту t , а также аналогичные характеристики для выходного токового импульса.

В работе произведено исследование преобразования

$$z(s) = \int_0^{\infty} t^s \frac{n(t)}{N} dt$$

где $n(t)$ - случайная функция, характеризующая выходной токовый импульс детектора;

N - число электронов в данной сцинтилляции, и найдены точные статистические характеристики центра тяжести токового импульса.

Произведен анализ составляющих дисперсии $D(t)$, который показал, что вклад флуктуаций формы одноэлектронной реакции не превосходит величины

$$g/(g-1)K$$

где g - среднее усиление динода,

K - усиление ФЭУ.

В работе продемонстрировано применение метода максимального правдоподобия для доказательства того, что при экспоненциальном законе высвечивания информация о начале процесса высвечивания полностью заключена в первом фотоэлектроне.

В работе приведены описание и основные характеристики дискриминирующих устройств, созданных автором и используемых для спектрометрии нейтронов в диапазоне 0,1 - 20 Мэв.

В главе III описаны методы построения устройств измерения временных интервалов наносекундного диапазона и методы улучшения их измерительных параметров. Приведен обзор современных методов построения преобразователей время-цифровой код со сравнительной оценкой их достоинств и недостатков. Для метода непосредственного кодирования с последовательным счетом серии в работе показа-

но, что при измерении пиков в спектре с шириной, малой по сравнению с шириной канала, определенное преимущество имеет асинхронная серия по сравнению с синхронной.

В работе предложены и проанализированы два метода преобразования временной интервал-цифровой код. Первый из них, названный методом статистического кодирования, является попыткой применения известного метода статистических испытаний к измерению временных интервалов с наносекундной точностью. Сущность предлагаемого метода состоит в периодической регенерации измеряемого интервала о заданным числом циклов и определении числа актов совпадений независимой опорной серии с регенерируемыми интервалами. Это число является цифровым кодом измеряемого интервала. Т.к. код является случайным числом, найдены условия получения его дисперсии, не превышающей ширины канала. Предложена примерная функциональная схема такого преобразователя и вариант его применения в качестве интерполирующего устройства.

Второй метод является попыткой применения известного способа двоичного взвешивания (последовательного приближения) к измерению временных интервалов. В основе метода лежит логическое устройство сравнения измеряемого интервала t с эталонным интервалом T , выполняющее функцию $t' = |t - T|$, где t' - величина интервала, включенного между двумя выходными сигналами этого устройства. Результат сравнения $t \cdot T$ фиксируется в бите кода, который является значением соответствующего двоичного разряда адреса.

Проанализированы два варианта построения преобразователя на основе такого логического узла. Первый из них представляет последовательность устройств сравнения с промежуточными эталонными задержками. Вторым вариантом содержит единственное устройство сравнения и удвоитель интервалов, замкнутые петлей задержанной обратной связи, содержащей единственный элемент эталонной задержки T . В обоих вариантах проанализированы ошибки и предложены пути их минимизации.

В работе проанализированы два варианта реализации метода статистического усреднения ширины каналов с точки зрения эффективности улучшения дифференциальной линейности для преобразователей различного типа.

Для усреднения по методу циклической шкалы усредненное $R_n(z)$ и исходное $R_0(z)$ распределения связаны соотношением:

$$R_n(z) = \int_0^T R_0(x) R_0(x+z) dx$$

Если считать $R_0(z)$ случайной функцией, эргодичной на интервале $0 - T$, то $R_n(z)$ есть её автокорреляционная функция $K_{RR}(z)$

$$R_n(z) = TK_{RR}(z)$$

Задаваясь спектральной плотностью $S(\omega)$ случайной функции $R_0(z)$, определяем $K_{RR}(z)$ и дифференциальную нелинейность ϵ_{n2}^2 по формуле:

$$\epsilon_{n2}^2 = T \int_0^T [R_n(z)]^2 dz$$

При усреднении по методу скользящей шкалы дифференциальная нелинейность ϵ_{n2}^2 рассчитывается по формуле:

$$\epsilon_{n2}^2 = 2 \int S(\omega) |K(\omega)|^2 d\omega$$

где $|K(\omega)|$ - модуль частотной характеристики четырехпольсника с импульсной характеристикой, описываемой функцией распределения добавляемых интервалов.

В работе проанализированы два вида спектральной плотности $S(\omega)$: постоянная и линейно нарастающая в диапазоне $0 - \omega_0$. Рассмотрены два вида $K(\omega)$, соответствующие равномерному распределению добавляемых интервалов и распределению при модуляции синусоидальным сигналом. Приведена сравнительная оценка рассмотренных вариантов усреднения.

Искажения спектров за счет просчетов были исследованы экспериментально, чем была подтверждена правильность теоретических выводов относительно возможности их коррекции. Два исследованных метода аппаратной коррекции - режим равной экспозиции и запрет регистрации при появлении более одного события из пачки - оказались неравноценными в следующих отношениях: режим равной экспозиции не приводит к уменьшению скорости регистрации при увеличении скорости поступления событий и менее чувствителен к непурассоновскому характеру потока событий. В работе также показано, что заметное уменьшение искажений достигается при равномерном распределении конца блокировки.

В главе IV описана аппаратура для временных измерений измерительного центра ФЭИ, созданная автором или при его непосредственном участии. Приведено краткое описание физических экспериментов, поставленных с помощью описанной аппаратуры. Даны описание и технические характеристики временных АИФ, быстрых дискриминаторов

ров, быстрых схем совпадений и специализированных устройств.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. В работе рассмотрено влияние различных ошибок измерительной системы на исследуемое временное распределение при бесконечной статистике отсчетов. Получены математические выражения, позволяющие определить способы уменьшения искажений, вызванных этими ошибками. Выявлены ошибки, влияние которых может быть уменьшено коррекцией измеренного спектра, и определены необходимые условия её проведения.

2. Получены математические выражения для определения погрешностей оценки неизвестного параметра исследуемого распределения при конечной статистике отсчетов. Для идеальной измерительной системы основная погрешность, связанная с ограниченным числом отсчетов, найдена на основе определения информации о параметре, содержащейся в измеренном спектре. Дополнительные погрешности оценены посредством учета потерь информации, связанных с ошибками реальной измерительной системы.

3. Установлено соотношение аппаратных и программных средств коррекции измеренных спектров для исключения влияния ошибок измерительной системы. Показано, что для ошибок, связанных с нелинейностью и нестабильностью, возможно применение как аппаратных, так и программных средств коррекции, тогда как для искажений за счет просчетов предпочтительно использование аппаратных средств.

4. Получена уточненная формула для дисперсии центра тяжести выходного импульса сцинтилляционного детектора, определены составляющие дисперсии заряда, собранного на аноде ФЭУ за заданное время, и оценена стабильность формы одноэлектронного импульса.

5. Детально проанализированы ошибки определения положения пика в спектре при использовании кодирующих устройств с синхронной и асинхронной серией. Показано, что при малых дисперсиях пика кодирующие устройства с асинхронной серией обеспечивают большую точность определения положения пика. Рассмотрен вопрос улучшения дифференциальной линейности временных АЦП с помощью статистического усреднения ширины каналов. Для двух вариантов его реализации предложен и использован метод оценки эффективности усреднения.

6. Предложено и проанализировано два метода построения временных АЦП – статистического кодирования и двоичного взвешивания.

7. Разработан и внедрен в эксплуатацию комплекс измерительных устройств, включающий временные АЦП, быстрые дискриминаторы, быстрые схемы совпадений и специализированные устройства. На их основе созданы спектрометры, которые в течение ряда лет успешно используются для спектрометрии нейтронов с энергиями 0,1–20 МэВ.

Результаты диссертационной работы отражены в 7 научно-технических отчетах и следующих основных публикациях:

1. Иванов А.А., Нестеренко В.С. Преобразователь времени в амплитуду на полупроводниковых элементах. ПТЭ, №6, 1962, стр. 75.

2. Иванов А.А., Нестеренко В.С., Тимохин Л.А. Звудящий генератор на туннельном диоде и короткозамкнутой линии задержки. ПТЭ, №3, 1967, стр. 77.

3. Гончар А.Н., Маталин Л.А., Нестеренко В.С. и др. Принцип организации измерительных мест и проведения экспериментов в измерительном центре ФЭИ. Труды конференции специалистов стран-членов СЭВ, Москва, 1970, ч. II, стр. 251.

4. Кулабухов Ю.С., Нестеренко В.С., Тимохин Л.А. Кодировщик устройства временных интервалов с разрешением 0,25 нсек. Труды конференции специалистов стран-членов СЭВ, Москва, 1970, стр. 251.

5. Иванов А.А., Кулабухов Ю.С., Нестеренко В.С. Устройство временной селекции для сигналов со сцинтилляционного счетчика. Труды УИ конференции по ядерной электронике, ч. IV, 1970, Атомиздат, стр. 221.

6. Иванов А.А., Кулабухов Ю.С., Нестеренко В.С., Тимохин Л.А. Кодировщик устройства временных интервалов с разрешением 0,5 нсек. Труды УИ конференции по ядерной электронике, ч. IV, 1970, Атомиздат, стр. 167.

7. Сальников О.А., Ловчикова Г.Н., Нестеренко В.С. и др. Взаимодействие быстрых нейтронов с ядрами железа, меди и ниобия. Ядерная физика, №6, т. 12, 1970, стр. II.

8. Демеников В.Г., Кулабухов Ю.С., Нестеренко В.С., Тимохин Л.А. Применение статистического усреднения для улучшения дифференциальной линейности временного АЦП. ПТЭ, №6, 1971, стр. 83.

9. A.I.Glotov, G.N.Lowtshikova, D.Seeliger, W.S.Nesterenko et al. Nanosekunden Pulsung des Tandem-Generators EGP-10M im FFI Obninsk. Jahresbericht ZFK-262, Dresden, 1973.

10. Ловчикова Г.Н., Сальников О.А., Нестеренко В.С., Угловое распределение нейтронов в реакциях $Fe^{56}(p,n)Co^{57}$ и $Zn^{66}(p,n)Ga^{66}$ для энергий нейтронов $E = 5, 6, 7$ МэВ. Препринт ФЭИ-470, Обнинск, 1973.

11. Гончар А.И., Деменков В.Г., Нестеренко В.С. и др. Модульная система для обеспечения амплитудно-временного анализа. Препринт ФЭИ-419, Обнинск, 1973.

12. Маталин Л.А., Чубаров С.И., Тимохин Л.А., Смирнов В.И., Нестеренко В.С. Электронные методы ядерной физики. Атомиздат, Москва, 1973.

13. Труфанов А.М., Ловчикова Г.Н., Нестеренко В.С. и др. Угловые распределения нейтронов в реакциях $Mg(p,n)$, $Ti(p,n)$, $Cr(p,n)$. Препринт ФЭИ-574, Обнинск, 1974.

14. Котельщикова Г.В., Кувшинов В.Д., Нестеренко В.С. и др. Энергетический спектр нейтронов спонтанного деления Os^{252} в области энергий от 0,5 до 7 МэВ. Препринт ФЭИ-575, Обнинск, 1974.

15. Лыткина В.М., Лычагин А.А., Нестеренко В.С., Миронов А.Н. Логическое устройство трехмерного анализа спектров ядерной реакции $(n, 2n)$. Препринт ФЭИ-542, Обнинск, 1974.

16. Деменков В.Г., Кулабухов Ю.С., Нестеренко В.С., Тимохин Л.А. Аппаратурная коррекция влияния просчетов на форму временных спектров. ПТЭ, №2, 1975, стр. 90.

17. Деменков В.Г., Нестеренко В.С. Быстрая схема совпадения. ПТЭ, №2, 1976, стр. 70.

18. Гуськов Ю.К., Деменков В.Г., Нестеренко В.С. и др. Времепролетный спектрометр для измерения сечения упругого рассеяния электронов с энергиями $E = 0,04 - 1,5$ эВ на атомах Na и Ne . Препринт ФЭИ-664, Обнинск, 1976.

19. Андрияшин А.В., Маталин Л.А., Нестеренко В.С. и др. Измерительное место на базе ЭВМ "Электроника-100" и ветви САМАС в системе сбора данных ядерно-физических экспериментов. I Всесоюзное совещание по автоматизации научных исследований в ядерной физике. Киев, 1976, стр. 27.

20. Гончар А.И., Деменков В.Г., Нестеренко В.С. и др. Комплекс измерительных модулей измерительного центра ФЭИ. I Всесоюзное совещание по автоматизации исследований в ядерной физике. Киев, 1976, стр. 106.

21. Деменков В.Г., Кулабухов Ю.С., Нестеренко В.С. и др.

временной аналого-цифровой преобразователь. I Всесоюзное совещание по автоматизации исследований в ядерной физике. Киев, 1976, стр. 191.

22. Деменков В.Г., Кулабухов Ю.С., Нестеренко В.С. и др. Система модулей для временного анализа. Препринт ФЭИ-724, Обнинск, 1976.

23. Деменков В.Г., Маталин Л.А., Нестеренко В.С. и др. Электронные устройства корреляционного спектрометра быстрых нейтронов по времени пролета. Препринт ФЭИ-723, Обнинск, 1976.

24. Колпачев А.Г., Чубаров С.И., Нестеренко В.С. и др. Электронная система для измерения двумерных спектров запаздывающих нейтронов. Вопросы атомной науки и техники, серия "Реакторостроение", вып. 5(19), стр. 11, Обнинск, 1977.

25. Деменков В.Г., Миронов А.Н., Нестеренко В.С. Логическое устройство для многодетекторного анализа. Вопросы атомной науки и техники, серия "Реакторостроение", вып. 5(19), стр. 16, Обнинск, 1977.

26. Труфанов А.М., Сальников О.А., Нестеренко В.С. и др. Спектрометр быстрых нейтронов на базе ЭЦП-10М ФЭИ. Вопросы атомной науки и техники, серия "Реакторостроение", вып. 5(19), стр. 29, Обнинск, 1977.

27. Ануфриенко В.Б., Сальников О.А., Нестеренко В.С. и др. Универсальный спектрометр быстрых нейтронов по времени пролета. Вопросы атомной науки и техники, серия "Реакторостроение", вып. 5(19), стр. 34, Обнинск, 1977.

ТБ-01715 от 24/УМ-1979 г. Объем I усл.л. Тираж 130 экз.
Отпечатано на ротационной машине, сентябрь 1979 г. 7543