

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора технических наук, профессора Подкина Юрия Германовича на диссертационную работу «Нейтронный спектрометр-дозиметр реального времени с вычислительным восстановлением энергетических спектров с помощью нейронных сетей», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук **Гримовым Александром Александровичем** по специальности 05.11.13 «Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий»

Актуальность избранной темы диссертационной работы.

Нейтронное излучение можно рассматривать как доминирующую составляющую продуктов ядерных реакций, происходящих в активной зоне ядерных реакторов, в значительной степени определяющую эффективность и безопасность его работы, его воздействие на природную среду и обслуживающий персонал.

Энергетический спектр нейтронного излучения обширен и может иметь различные формы в разных зонах реактора. В атомной энергетике он меняется от сотых долей электрон-вольта до двух десятков мегаэлектрон-вольт. В ядерно-физических и космических исследованиях энергетический диапазон нейтронного излучения еще шире. В частности, биологическое действие нейтронного излучения на организм человека в диапазоне энергий нейтронов от 0,025 эВ до 15 МэВ изменяется в 50 раз, что, безусловно, необходимо учитывать при вычислении эквивалентной дозы облучения. Весьма разнообразны и воздействия спектральных составляющих нейтронного потока на облучаемые объекты, поскольку нейтроны способны вступать в реакции с ядрами атомов практически любых веществ, причем сечения этих реакций сильно зависят от энергии нейтронов. Поэтому для обеспечения высо-

кой информативности и объективности систем радиационного контроля особое внимание следует уделять спектральным измерениям, а оценку интенсивности излучения можно выполнять на основе интегрирования спектра.

В настоящее время при проведении ядерно-физических исследований для спектрометрии нейтронного излучения используют громоздкие, сложные и весьма дорогостоящие времяпролётные установки, а в ядерной энергетике – активационный анализ. Но эти, по сути, лабораторные методы и средства исследования, не рассчитаны на измерения в реальном масштабе времени, они малопроизводительны, процесс измерения трудоёмок и доступен только высококвалифицированным исполнителям. Да и популярные за рубежом многошаровые спектрометры Боннера, тоже, по сути, реализуют лабораторный метод, т.к. базируются на последовательном измерении одним и тем же детектором исследуемого нейтронного потока при его погружении в сферы замедлителей нейтронов различных диаметров, с последующим вычислительным восстановлением спектра на компьютере. Поэтому до сих пор в ядерной энергетике повсеместно применяют средства контроля нейтронного излучения на основе измерений интегральной плотности нейтронных потоков, и, лишь изредка, поток разделяется на две или три энергетические составляющие.

Таким образом, налицо противоречие между потенциально возможной и реализуемой известными средствами измерений информативностью систем контроля нейтронного излучения.

Выполненное автором диссертационной работы исследование направлено на разрешение этого противоречия путем совершенствования системы контроля нейтронного излучения с использованием селективного детектирования и вычислительного восстановления спектров в реальном времени. Поэтому актуальность выполненной Гримовым А. А. работы не вызывает сомнений.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Обоснованность научных положений, выводов, рекомендаций и заключений, сформулированных в диссертации, базируется на критическом анализе проблем нейтронной спектрометрии, результатов исследований, выполненных российскими и зарубежными специалистами, четкой постановке цели и частных задач, их последовательном решении с применением современной теории дозиметрического контроля нейтронного излучения, развития методов и средств получения его энергетического спектра в реальном времени. Рационален выбор в качестве основного измерительного преобразователя селективного к энергии нейтронов детектора с варьируемой по спектру передаточной характеристикой. Логично использование имитационного моделирования входных нейтронных потоков с различными формами спектров и имитационных моделей спектральных характеристик, используемых детекторов, при формировании математической модели восстановления спектра по выходным сигналам детекторов. Убедителен выбор нейронных сетей в качестве инструментария для вычислительного восстановления спектров нейтронного излучения. Обоснованность основных научных положений, сформулированных в диссертации, подтверждена также рецензиями 15 опубликованных в научных изданиях работ, из которых 4 включены в перечень ВАК, и получила подтверждение при непосредственном обсуждении на международных и российских конференциях, семинарах, симпозиумах.

Достоверность и новизна научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

К числу наиболее существенных результатов диссертации следует отнести:

1. Систему имитационного моделирования, позволяющую исследовать возможность создания нейтронного спектрометра реального времени на основе многоканального блока детектирования с варьируемыми спектральными характеристиками и вычислительного восстановления спектра с помощью искусственной нейронной сети. Синтезированная система действительно позволяет генерировать обучающую и проверочную выборки модельных спектров необходимого объёма по базовым опорным спектрам, варьировать спектральные характеристики канальных детекторов и исследовать различные варианты типов и конфигураций нейронных сетей, используемых для вычислительного восстановления спектров.

2. Существенно новую методику обучения нейронных сетей, используемых для вычислительного восстановления спектра по модельным спектрам обучающей выборки и математическим моделям спектральных характеристик детекторов, используемых в спектрометре. Предложенный подход позволяет оптимизировать алгоритмы имитационного моделирования.

3. Оригинальный способ измерения интенсивности стохастических потоков выходных импульсов детекторов, позволяющий совместить минимизацию времени измерения спектра и обеспечение статистической достоверности результатов при приемлемых аппаратных затратах.

4. Участие автора в разработке способа получения опорных нейтронных полей с разнообразной формой спектров от одного радиоизотопного источника нейтронов.

Система имитационного моделирования, структура которой приведена на стр. 49, состоит из базы данных спектров нейтронного излучения различного генезиса, комплекса программ для: обработки этих спектров; ге-

нерирования обучающей и проверочной выборок; моделирования спектральных характеристик используемых детекторов и их выходных сигналов; исследования нейронных сетей различных конфигураций для вычислительного восстановления энергетических спектров моделируемых нейтронных потоков. Новизна синтезированной системы заключается в использовании модельных выборок, в которых спектральные плотности входных реализаций по каждому энергетическому интервалу точно известны. Это позволяет провести обучение нейронной сети, сравнивая её выходные векторы с модельными. Личный вклад автора состоит в:

- формировании базы данных базовых спектров различных источников нейтронного излучения (п. 2.2 диссертации, с. 49-51);
- разработке алгоритмов и программного обеспечения модуля обработки и моделирования базовых спектров с произвольным разбиением на энергетические интервалы (п. 2.2 диссертации с. 51-54, получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ – личное участие – 50%);
- разработке алгоритма и реализующей его программы генерирования обучающей и проверочной выборок модельных реализаций по базовым спектрам (п. 2.2 диссертации, с. 54);
- разработке алгоритма и реализующей его программы обработки спектральных характеристик детекторов (п. 2.3 диссертации, с. 54-57);
- разработке общей управляющей программы системы имитационного моделирования.

Разработанная лично Гримовым А. А. *методика выбора архитектуры, конфигурации и обучения нейронных сетей* (п. 2.4 диссертации с. 57-66), опирающаяся на модельные реализации спектров обучающей выборки и модели спектральных характеристик используемых детекторов, позволила устранить существовавшее ранее ограничение на использование нейронных сетей для совместной обработки выходных сигналов детекторов при вычислительном восстановлении спектра измеряемого нейтронного потока.

Способ измерения интенсивности стохастических потоков им-

пульсов, детально аргументированный автором в п. 4.3.2 диссертации (с. 102-107) выгодно отличается от применявшихся ранее способов контроля (по заданному времени измерения, по заданному числу зарегистрированных импульсов и с использованием метода скользящего среднего). Способ основан на накоплении импульсов параллельно в двух счётчиках и при его программной реализации более экономично использует ресурсы микропроцессора, повышает достоверность результатов измерений при низких интенсивностях измеряемых потоков, позволяет сгладить противоречие между статистической погрешностью, затратами времени на один цикл измерения и скоростью реакции на изменения интенсивности измеряемого потока. Личный вклад автора – 70 %.

Использованный в диссертационной работе *способ создания нейтронных полей с разнообразной формой энергетических спектров от одного источника нейтронного излучения*, позволил создать испытательную установку для экспериментального исследования спектральных характеристик нейтронных детекторов, нейтронных радиометров и спектрометров (п. 4.4 диссертации, с.112-116). Личный вклад в разработку составил 40 %.

Достоверность этих научных положений подтверждается приведенными в работе результатами экспериментальных исследований макетного образца нейтронного спектрометра-дозиметра реального времени на испытательной установке для создания опорных нейтронных полей с разнообразными формами спектра, а также данными, полученными при компьютерном моделировании. Моделирование выполнялось с использованием апробированных стандартных программных пакетов GEANT-4 (для расчётов взаимодействий нейтронов с веществом), MATLAB (для создания имитационных моделей реализаций обучающей и проверочной выборок, спектральных характеристик используемых детекторов, выбора конфигураций и реализации процедур обучения нейронных сетей) и OrCAD (для схемотехнического моделирования), что обеспечило высокую надежность результатов. Приоритет

разработок автора в данной области подтверждается двумя свидетельствами РФ на программы для ЭВМ. Следует также отметить корректность использования современных методов математического моделирования, математической обработки экспериментальных данных, активное использование нейронных сетей, принципов схемотехнического и алгоритмического проектирования, разумное сочетание традиционных и оригинальных методов, алгоритмов и аппаратных средств для измерения и вычислительного восстановления спектров нейтронного излучения.

Практическая ценность работы несомненна и заключается в том, что все выдвинутые теоретические положения реализованы, и помимо убедительных результатов имитационного моделирования подтверждены экспериментальными исследованиями, проведенными с макетным образцом нейтронного спектрометра-дозиметра на разработанной с участием диссертанта установке для создания опорных нейтронных полей с разнообразной формой спектров. Полученные результаты позволяют приступить к опытно-конструкторским работам по разработке промышленных образцов нейтронных спектрометров.

Общий анализ содержания диссертационной работы.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка использованной литературы, включающего 110 наименований, изложена на 138 страницах машинописного текста и поясняется 34 рисунками и 46 таблицами.

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследований, научная новизна, практическая ценность и положения, выносимые на защиту.

В первой главе на основе аналитического обзора известных: времяпролётного, многошарового методов, методов активационного анализа и протонов отдачи доказана их непригодность для приборной реализации спектрометров

произвольных нейтронных потоков реального времени. Поэтому принята за основу выдвинутая в Юго-Западном университете концепция построения нейтронного спектрометра реального времени путем совместной обработки информации, получаемой от нескольких детекторов с разнообразными спектральными характеристиками, с помощью предварительно обученной нейронной сети. Рассмотрены задачи, которые необходимо решить, для исследования реализуемости и эффективности данной концепции и построения на этой основе промышленного нейтронного спектрометра реального времени. В соответствии с этими задачами сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

Во второй главе разработана система имитационного моделирования, состоящая из:

- базы данных из 45 типичных спектров нейтронного излучения радиоизотопных источников, критических сборок, и ядерных реакторов в различных зонах;

- комплекса программ, обеспечивающих: формирование гетерогенных спектров в виде ступенчатых функций; генерирование обучающей и проверочной выборок; моделирование выходных сигналов детекторов; исследование нейронных сетей различных конфигураций для вычислительного восстановления энергетических спектров.

Проведен выбор архитектуры и конфигурации нейронных сетей для решения двух задач: восстановления энергетического спектра нейтронного потока в виде ступенчатой функции на 9 интервалах энергии и отдельного измерения плотности потоков тепловых, промежуточных и быстрых нейтронов по сигналам, получаемым от серийного трёхканального блока детектирования БДКС-05С.

В третьей главе описаны результаты имитационного моделирования нейтронного спектрометра на основе блока детектирования БДКС-05С с двумя вариантами обработки его выходных сигналов с помощью нейронных сетей: для восстановления энергетического спектра в виде ступенчатой

функции на девяти десятичных интервалах энергии с общим энергетическим диапазоном от 0,025 эВ до 25 МэВ и для определения плотностей потоков тепловых, промежуточных и быстрых нейтронов. Второй вариант позволил моделировать функции измерительного преобразования прототипного прибора МКС-03С, в состав которого и входил блок детектирования БДКС-05С. Оба варианта нейронных сетей обучались в созданной системе имитационного моделирования на выборках модельных спектров, синтезированных на основе собранных базовых спектров. Большое разнообразие форм базовых спектров и дополнительная вариация их форм в процессе синтеза модельных спектров за счёт добавления случайной величины к усреднённым на заданных энергетических интервалах значениям спектральной плотности обеспечивали достаточную универсальность и достоверность обучения нейронных сетей.

Результаты моделирования получились весьма обнадеживающими: среднеквадратические погрешности восстановления значений усреднённых по десятичным интервалам энергии плотностей нейтронных потоков и на обучающей, и на проверочной выборках не превысили 1 %.

Результаты экспериментального исследования макетного образца спектрометра-дозиметра на испытательной установке для создания опорных нейтронных полей с разнообразной формой спектра подтвердили высокую эффективность предложенного способа измерения спектров нейтронных потоков. Среднеквадратические отклонения измеренных значений усреднённых на десятичных интервалах энергии спектральных плотностей от реальных значений не превысили 5 %, при этом для подавляющего большинства реализаций они не вышли за пределы одного-двух процентов, а по интегральной плотности потоков они для всех реализаций оказались менее одного процента.

Еще убедительнее преимущество, достигнутое при обработке информации на нейронной сети конфигурации 3-3-3 по сравнению с результатами моделирования измерительного преобразования без совместной обработки

выходных сигналов измерительных каналов. Если в первом случае погрешности не превышают 8,2 %, то во втором они достигали тысяч процентов.

Четвёртая глава посвящена технической реализации макетного образца нейтронного спектрометра на основе блока детектирования БДКС-05С, установки для создания опорных нейтронных полей с разнообразной формой спектра и экспериментальным исследованием макетного образца на данной установке.

С учётом того, что использование блока детектирования БДКС-05С в спектрометре является временным решением (ввиду его несовершенства) измерительный блок проектировался как унифицированный, пригодный как для данного блока, так и для оригинальных разрабатываемых в настоящее время многодетекторных блоков детектирования. В связи с этим в нём заложена возможность параллельной работы до восьми измерительных каналов. Обработка выходных сигналов всех измерительных каналов ведётся параллельно с помощью встроенного микроконтроллера. При этом, реализуется оригинальный способ накопления импульсов по каждому каналу, обеспечивающий минимально возможное время реакции прибора на изменения интенсивности измеряемого нейтронного потока при сохранении достаточно высокой статистической достоверности накапливаемой информации, по которой в дальнейшем восстанавливается спектр измеряемого потока. Восстановление спектра выполняется с помощью предварительно обученной нейронной сети конфигурации 3-6-9. Для макетного образца прибора такое решение вполне оправдано, поскольку обеспечивает наибольшую программную гибкость. В дальнейшем не представит особых затруднений эмулировать уже обученную нейронную сеть на встраиваемом в прибор дополнительном микроконтроллере.

Установка создавалась на базе действующей на Курском заводе «Маяк» поверочной установки нейтронных радиометров-дозиметров ИЛ-1. С помощью достаточно простых решений удалось получать на модернизированной установке до 35 нейтронных полей с различными формами энергетических

спектров от одного радиоизотопного источника.

В Заключении сформулированы основные результаты работы.

Конечно, как и всякая новаторская работа, диссертация не свободна от недостатков. Основные из них следующие.

Замечания:

1. В диссертации (а, тем более, в автореферате) недостаточно чётко отражена мотивация и аргументация ряда принимаемых решений. В частности, практически отсутствует аргументация по выбору блока детектирования БДКС-05С для построения нейтронного спектрометра (хотя его недостатки очевидны); отсутствует аргументация и при выборе 8 измерительных каналов при проектировании макетного образца нейтронного спектрометра.

2. Не проведена оценка возможных погрешностей вычисления спектров опорных нейтронных полей с помощью библиотеки программ GEANT-4. Не ясно, каким образом при этом определялся исходный спектр образцового источника.

3. Используемая автором терминология порой излишне специфична и даже неряшлива и не всегда коррелирует с терминологией, применяемой в метрологии. Например, на стр. 62 написано: «Входными параметрами являются выходные данные...».

4. Встречаются противоречивые утверждения, в частности неоднократно указывается, что блок детектирования БДКС-05С имеет три измерительных канала, а на стр. 95 диссертации написано, что он содержит 5 каналов.

4. В тексте диссертации и автореферата имеются стилистические небрежности и явные пропуски. В частности, в диссертации на стр. 57 в последнем абзаце есть явно незаконченная фраза: «В созданной системе имитационного моделирования имеется в виду не сам блок детектирования, а его имитационная модель, на вход которой последовательно загружаются имитационные модели реализаций спектров».

Однако эти недостатки не принципиальны и не снижают ценности данной диссертационной работы.

Заключение:

Диссертация А. А. Гримова «Нейтронный спектрометр-дозиметр реального времени с вычислительным восстановлением энергетических спектров с помощью нейронных сетей» написана автором самостоятельно, является законченной научно-квалификационной работой, обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, обеспечившие разработку нейтронного спектрометра реального времени, реализованного в виде макетного образца, превосходящего по своим характеристикам имеющиеся мировые аналоги, что подтверждается приведенными в ней результатами и данными и свидетельствует о личном вкладе автора диссертации в науку.

Содержание диссертации соответствует п.п. 1 и 3 паспорта специальности 05.11.13 – «Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий» и полностью отвечает требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Достоверность защищаемых положений определяется корректным использованием методов имитационного моделирования, теории нейронных сетей, а также апробированных пакетов прикладных программ, реализующих эти методы, и подтверждается результатами проведенных экспериментальных исследований. Автореферат диссертации и научные публикации диссертанта достаточно полно отражают содержание диссертации.

На основе всего вышесказанного можно заключить, что диссертационная работа Гримова А.А. посвящена решению актуальной научно-технической задачи, представляет собой законченную научную работу, в которой изложены новые научно обоснованные технические, технологические или иные решения и разработки, имеющие существенное значение для развития страны, а её автор заслуживает присуждения ученой степени канди-

дата технических наук по специальности 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий.

Официальный оппонент, д.т.н., профессор,
зав. кафедрой «Конструирования и
производства радиоаппаратуры»
Сарапульского политехнического института
(филиала) федерального государственного
бюджетного образовательного учреждения
высшего профессионального образования
«Ижевский государственный технический
университет имени М.Т. Калашникова»



Подкин Юрий Германович

Почтовый адрес: 427960, г. Сарапул, УР, ул. Нагорная, 2, кв.3

тел./факс: (34147) 40341, (3412) 776055

e-mail:kipr@spi.mn

Подпись профессора Подкина Ю.Г. удостоверяю
директор СПИ Т.А. Беркутова



13.03.2015г.