

СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ ЯДЕРНЫХ УСТАНОВОК

Г. Н. Пикулина, М. А. Овчинников, В. А. Юхневич, А. С. Кошелев, Ю. М. Дроздов,
Н. В. Распопов, В. С. Майорников, И. М. Пискорский

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

В статье рассматриваются принципы построения, структура и функциональные особенности разработанных во ВНИИЭФ специализированных систем контроля физических параметров исследовательских ядерных установок (ИЯУ): универсальных многофункциональных систем для регистрации широкого спектра параметров ионизирующего излучения ИЯУ и специализированных комплексов, предназначенных для измерения отдельных физических характеристик или привязанных к конфигурации эксперимента.

Ключевые слова: исследовательская ядерная установка, нейтронно-физические параметры ионизирующего излучения, гамма-излучение, измерительный канал, управляющее программное обеспечение.

SPECIALIZED SYSTEMS AIMED AT CONTROLLRING PARAMETERS OF RESEARCH NUCLEAR FACILITIES IONIZING RADIATION / G. N. PIKULINA, M. A. OVCHINNIKOV, V. A. YUKHNEVICH, A. S. KOSHELEV, YU. M. DROZDOV, N. V. RASPOPOV, V. S. MAJORNIKOV, I. M. PISKORSKIJ // Design approaches, structure concepts and functional features for the specialized systems developed in RFNC-VNIEEF are presented in the article. There are multipurpose systems to register wide range of ionizing radiation parameters and special-purpose systems to register particular characteristics or systems referred to the specific experiment configuration.

Key words: research nuclear facilities, neutron-physical parameters of ionizing radiation, gamma radiation, measuring channel, control software.

Введение

Во ВНИИЭФ разработаны и постоянно совершенствуются средства диагностики радиационных полей исследовательских ядерных установок (ИЯУ) в различных режимах их работы: детекторы быстрых и тепловых нейтронов, детекторы-дозиметры гамма-квантов, – и разнообразные средства и методики метрологического обеспечения: моделирующие опорные поля нейтронов, специализированный гамма-источник БР-К1, методики калибровки детекторов гамма-излучения ВЭД-2

и КГК-2 и т. д. [1]. На основании накопленного опыта по эксплуатации ИЯУ во ВНИИЭФ [2] и созданию контрольно-измерительных систем для ядерных установок, результатов изучения особенностей функционирования промышленных ионизационных камер в качестве детекторов [3] сотрудники ВНИИЭФ разработали специализированные системы – программно-управляемые комплексы, предназначенные для регистрации и контроля физических параметров излучения ИЯУ. Среди разработок есть универсальные многофункциональные системы [1], которые измеряют ши-

рокий спектр физических параметров ионизирующего излучения: плотность потока нейтронов, флюенс нейтронов, мощность и суммарное энерговыделение ИЯУ, реактивность, мощность дозы и дозу гамма-излучения. Также большое распространение получили специализированные комплексы, предназначенные для измерения отдельных физических характеристик ионизирующего излучения, и системы, привязанные к специфической конфигурации эксперимента [3].

Основная задача специализированных систем заключается в регистрации первичных показаний детекторов нейтронного и гамма-излучений: силы тока и скорости счета импульсов, – на основании которых производится расчет физических параметров ионизирующего излучения ИЯУ, отображение и контроль их значений непосредственно в ходе проведения измерений.

Аппаратная структура специализированных систем

Для организации токовых и счетных измерительных каналов специализированных систем было решено использовать разработанные во ВНИИЭФ интеллектуальные модули различного функционального назначения: измерители тока, измерители скорости счета импульсов, высоковольтные преобразователи напряжения [4].

Каждый такой модуль является аппаратно-программным блоком, в состав которого входит микроконтроллер. Модули объединяются в сеть, организованную по стандарту RS-485. Для каждого модуля разработано специальное программное обеспечение, реализующее функциональное назначение этого модуля и обмен с верхним уровнем управления. Конструктивно модули выполнены в стандарте Евромеханика 19" и могут быть вставлены в крейт – приборный корпус Ratiopac PRO, который можно монтировать в стандартную 19" стойку или использовать в качестве настольного или переносного корпуса [5].

На все модули получены свидетельства об утверждении типа средств измерений.

В токовом измерительном канале предусмотрено использование измерительных модулей токового канала ИМТК (диапазон измерения силы тока – от 10^{-11} до $2,5 \cdot 10^{-3}$ А) или ИМТК-Л (диапазон измерения силы тока – от $5 \cdot 10^{-11}$ до $2,5 \cdot 10^{-3}$ А). ИМТК-Л, в отличие от ИМТК, является безынерционным измерителем и выдает значения кода измеренной силы тока в масштабе десятичного логарифма. Погрешность измерения тока в диапазоне от $1 \cdot 10^{-11}$ до 10^{-8} А – не более 5 %, в диапазоне от 10^{-8} до $2,5 \cdot 10^{-3}$ А – не более 3 %. Для обеспечения высокого напряжения питания ионизационной камеры (ИК) в токовом канале используется модуль высоковольтного преобразователя напряжения ВПН-500, который обеспечивает высоковольтное напряжение питания в пределах от 100 до 500 В и от минус 500 до минус 100 В (выходной ток – не более 5 мА, нестабильность выходного напряжения за 8 часов – не более 1 %).

В токовом канале измерения предусмотрено использование сразу двух токовых измерительных модулей (ИМТК или ИМТК-Л) для отдельной регистрации секционных токов в схеме однополярного питания по общему для секций электроду токовых камер [3]. В этом случае токовый канал измеряет два токовых сигнала от одного детектора: γ -составляющую и $\gamma+n$ -составляющую исследуемого излучения.

В счетном канале измерения используется канал измерительный импульсный (КИИ), в состав которого входят измерительный модуль счетчика нейтронов ИМСН с диапазоном измерения скорости счета от 0 до $1 \cdot 10^5$ имп./с (при погрешности измерения скорости счета в диапазоне от 100 до $1 \cdot 10^5$ имп./с – не более 3 %, в диапазоне от 0 до 100 имп./с погрешность не нормируется) и усилитель-дискриминатор импульсного канала. Для обеспечения высокого напряжения питания счетчиков нейтронов используется модуль ВПН, который кроме платы ВПН-500 содержит дополнительное устройство ВПН-2000, обеспечивающее высоковольтное напряжение от 500 до 2000 В.

В качестве датчиков используются детекторы с различными физическими принципами получения сигнала и разной спектральной

чувствительностью. В токовых каналах применяются ИК типа КГК-2, КНК-15, КНК-53М, КНК-4, вакуумированные детекторы типа ВЭД-2, откачанная камера деления КНК-15-1, в счетных каналах – счетчики детекторов нейтронов типа СНМ и камеры деления КНК-2-7М и КНК-2-8М, применяемые в счетном режиме. Тем самым обеспечивается широкий диапазон регистрируемых параметров ионизирующего излучения.

Структура специализированных систем

При разработке структуры систем для измерения и контроля параметров ионизирующего излучения было решено использовать ниточную структуру построения измерительных каналов, когда каждый канал функционально не зависит от других. Обработываемые сигналы измерительных трактов гальванически разделены и не влияют на работу друг друга. Канальный принцип организации позволяет быстро и эффективно менять конфигурацию системы (изменять число и тип измерительных каналов), а также производить ее обслуживание. Измерение и обмен информацией с другими подсистемами осуществляются с применением средств вычислительной техники (контроллера или компьютера), которые также обеспечивают контроль исправной работы измерительного канала.

Специализированная система строится как многоуровневая система сбора и обработки данных [6]. На данном этапе реализованы

трех- и четырехуровневые системы. Количество уровней обработки данных системы определяется назначением и требованиями к скорости и объему обрабатываемой информации. Так в четырехуровневой системе первый уровень – это устройства формирования измерительного сигнала (детекторы), второй уровень – устройства сбора и обработки данных (измерители тока и скорости счета импульсов), третий уровень – устройство предварительной обработки данных, четвертый верхний уровень – устройство накопления и обработки данных. Для построения третьего и четвертого уровней могут быть использованы различные микропроцессорные устройства: микроконтроллеры, компьютеры, построенные на микропроцессорах с оригинальной архитектурой, и персональные компьютеры (ПК). Пример структуры четырехуровневой системы контроля параметров ионизирующего излучения приведен на рис. 1.

Во ВНИИЭФ был разработан микропроцессорный блок обработки данных БОД [4], выполненный в стандарте Евромеханика 19" и используемый в качестве контроллера третьего уровня в измерительной системе. БОД управляет работой функциональных модулей нижнего уровня ИМТК, ИМТК-Л, ИМСН, ВПН по последовательной шине данных в формате RS-485, являясь на ней ведущим устройством. В свою очередь, модули БОД могут объединяться в сеть в формате Ethernet или в формате RS-485 и подключаться к управляющему устройству верхнего уровня.

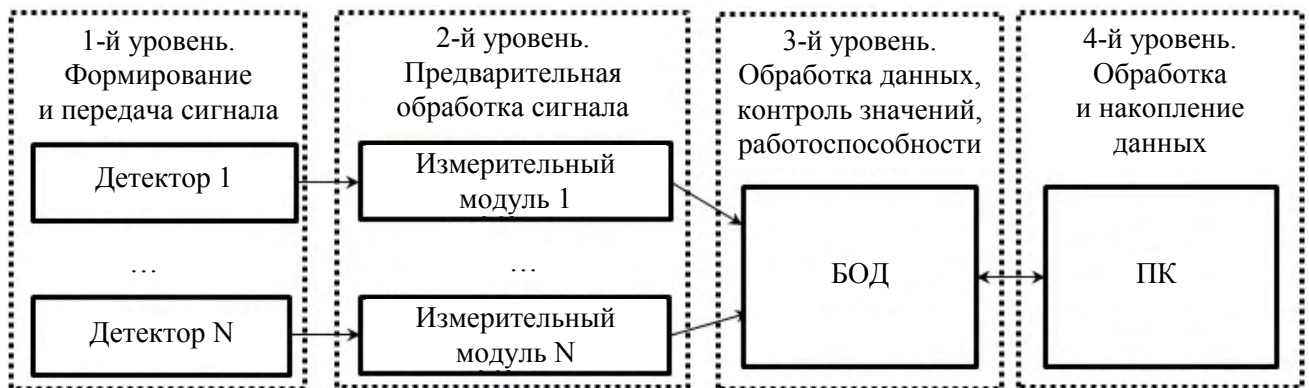


Рис. 1. Структура четырехуровневой системы измерения и контроля

Встроенное программное обеспечение БОД функционирует под управлением операционной системы реального времени QNX Neutrino 6.5. БОД принимает и обрабатывает результаты первичных измерений (значения силы тока и скорости счета импульсов) от модулей ИМТК, ИМТК-Л и ИМСН, выполняет шивку данных в поддиапазонах пересечения (одновременного измерения сигналов от различных детекторов), что позволяет расширить диапазон измерений. БОД выполняет расчёт и индикацию значений физических параметров ионизирующего излучения ИЯУ. В программном обеспечении (ПО), управляющем работой БОД, предусмотрено редактирование коэффициентов, используемых для вычислений значений физических характеристик, что делает возможным менять набор получаемых параметров, не внося изменений в управляющую программу. Также задаются пороговые значения для физических параметров, при которых БОД формирует электрические сигналы типа «сухой контакт» аварийной и предупредительной сигнализации. Таким образом БОД может подключаться к СУЗ ИЯУ и использоваться в составе каналов контроля мощности ИЯУ совместно с токовыми и счетными измерительными модулями. Системы с использованием БОД могут работать автономно без подключения к управляющему компьютеру.

Практическая реализация

Представленные компоненты аппаратной части и принципы структурной организации позволяют оперативно разрабатывать специализированные системы регистрации и контроля физических параметров ионизирующего излучения ИЯУ. Они могут различаться по количеству задействованных счетных и токовых измерительных каналов и по количеству используемых иерархических уровней, что обусловлено конкретной областью применения и решаемыми задачами. Функциональное назначение систем, в основном, определяется управляющим ПО верхнего уровня.

В ходе практической реализации систем контроля параметров ионизирующего излу-

чения ИЯУ была сформирована и отлажена библиотека компонентов, обеспечивающих опрос измерительных модулей, обработку результатов измерений, их архивацию и визуализацию. Библиотека позволяет быстро создавать управляющее ПО со следующими характеристиками:

- настраиваемый пользовательский интерфейс, удобный оператору;
- разнообразные возможности по представлению информации;
- возможность адаптации к условиям измерения;
- сохранение результатов измерений в виде, удобном для дальнейшей обработки;
- работа в реальном времени в круглосуточном режиме;
- отсутствие ограничений на размеры регистрируемых файлов;
- специальная, расширяемая при необходимости, математическая обработка;
- быстрый отклик на изменения условий в процессе измерений.

При формировании библиотеки учитывались высокие требования к надежности и корректности работы измерительных комплексов, так как от эффективности и устойчивости их работы зависят результаты дорогостоящих экспериментов.

В итоге, при разработке новой специализированной системы необходимо определиться с количеством и типом измерительных каналов, иерархической структурой, уточнить требования пользователей к программному интерфейсу – тип и вид представляемой информации. Разработка ПО верхнего уровня производится с использованием уже готовой библиотеки компонентов. Такой подход не требует много времени на настройку аппаратной и программной частей.

Таким образом, с помощью одних и тех же средств аппаратного и программного обеспечения можно быстро разрабатывать надежные системы, выполняющие различные измерительные и контролирующие функции и имеющие специализированный пользовательский интерфейс.

Функциональные особенности специализированных систем контроля параметров ионизирующего излучения

В качестве примеров реализации описанного подхода рассмотрим следующие измерительные системы, разработанные во ВНИИЭФ: универсальный многоканальный программно-управляемый комплекс «ТОК-СЧЕТ» и специализированные комплексы МЭР-метр (Мощность, Энергия, Реактивность) и «Реактиметр». Пользовательский интерфейс программ управления для всех измерительных систем проектировался с учетом того, что с ним будут работать специалисты, обслуживающие ИЯУ. На рис. 2 представлен внешний вид основных окон для каждого комплекса.

В настоящее время комплекс «ТОК-СЧЕТ» обслуживает до восьми токовых каналов и до четырех счетных каналов измерения. Причем измерительные каналы могут подключаться непосредственно к управляющему ПК по сети в стандарте RS-485 или через БОД. Комплекс «ТОК-СЧЕТ» предназначен для обеспечения исследовательских и прикладных работ в области дозиметрии нейтронного и гамма-излучений в смешанных полях ИЯУ, а также для исследовательских и методических работ при создании каналов контроля мощности для ИЯУ. В зависимости от используемой конфигурации обработка первичных показаний детекторов и расчет значений физических характеристик производятся на верхнем уровне или на уровне БОД. Тип рассчитываемого вторичного параметра для каждого канала задает экспериментатор, определяя название физической величины, ее размерность и коэффициент, используемый для расчета. Тем самым обеспечивается возможность использования комплекса «ТОК-СЧЕТ» в различных экспериментах без изменений в аппаратной и программной части. Зарегистрированные и расчетные данные сохраняются в едином текстовом файле. Такой формат универсален для последующей обработки данных.

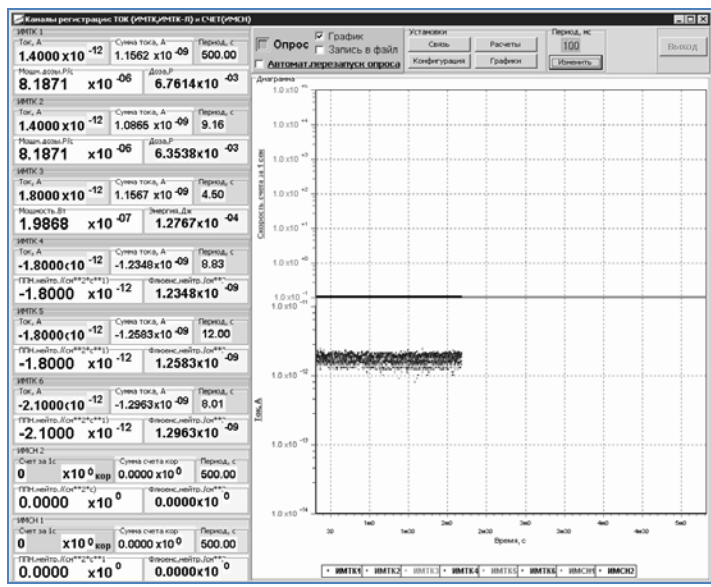
МЭР-метр предназначен для получения значений физической мощности, энерговыделения, реактивности ИЯУ в ходе проведения

измерений при отдельной регистрации токовых откликов функциональных секций промышленной газонаполненной ионизационной камеры типа КНК-4. Использование двухсекционной камеры типа КНК-4 при отдельной регистрации секционных токов в схеме однополярного питания по общему для секций электроду практически полностью исключает влияние гамма-составляющей излучения ИЯУ и отфильтровывает отклики процессов, приводящих к появлению токового ложного выходного сигнала, который вносит существенную погрешность при измерении плотности потока нейтронов [3].

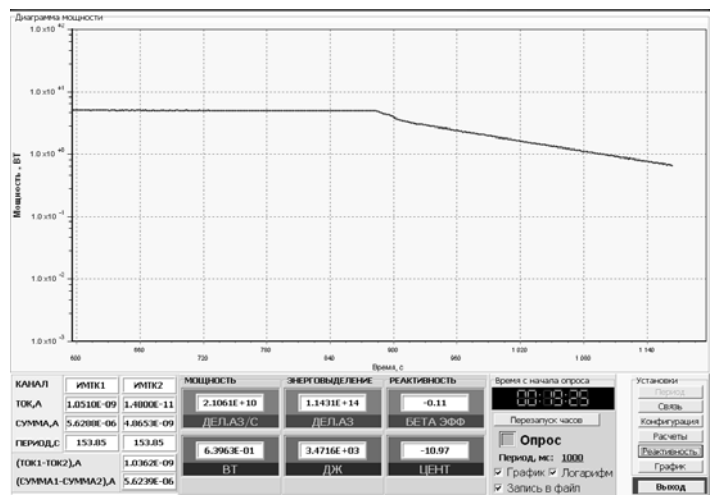
МЭР-метр содержит два токовых канала, используемых для измерения силы тока $\gamma+n$ -составляющей и силы тока γ -составляющей, соответственно. Аппаратная структура МЭР-метра показана на рис. 3.

В ходе измерений управляющая программа вычисляет ток нейтронной составляющей как разность двух токов, по которой рассчитываются нейтронно-физические параметры ИЯУ: мощность, энерговыделение, реактивность. Полученные значения отображаются на экране в цифровом виде, а мощность – и в виде диаграммы. МЭР-метр увеличивает достоверность регистрации нейтронно-физических параметров ИЯУ на быстрых нейтронах, особенно на участке спада интенсивности излучений ИЯУ (то есть на «хвосте» импульса) [3].

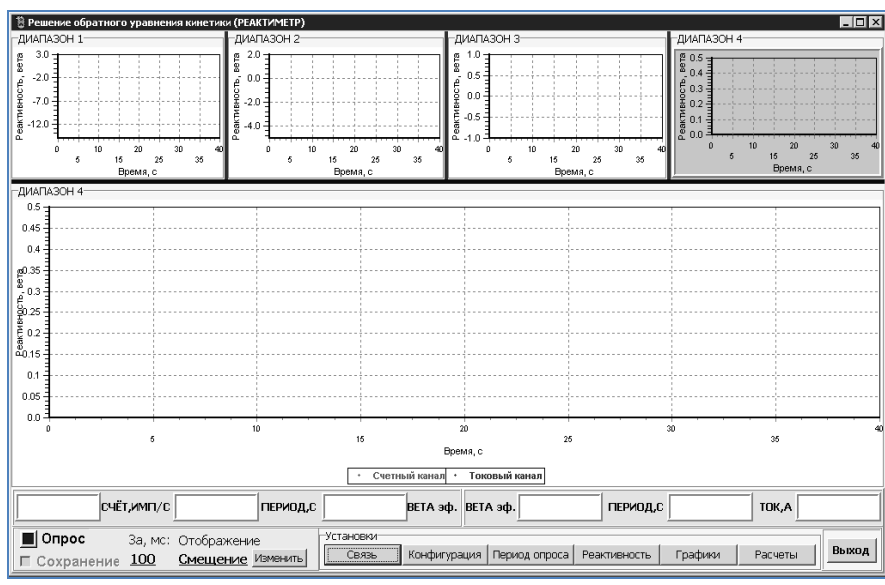
Программно-управляемый комплекс «Реактиметр» используется как дополнительный прибор, предназначенный для измерения и контроля. В ходе измерений «Реактиметр» вычисляет значения реактивности на основе решения обратного уравнения кинетики на всем диапазоне изменения мощности ядерной установки [7]. В качестве вспомогательного сервиса в управляющей программе предусмотрены вывод первичных показаний детекторов (значений скорости счета и силы тока) и расчет периода их изменений. При проектировании интерфейса пользователя учитывалось пожелание заказчиков выбирать диапазоны и масштаб для отображения значений реактивности (в $\beta_{эф}$) при проведении эксперимента.



а



б



в

Рис. 2. Главные окна управляющего ПО для систем контроля параметров ионизирующего излучения: а – «ТОК-СЧЕТ»; б – МЭР-метр; в – «Реактиметр»

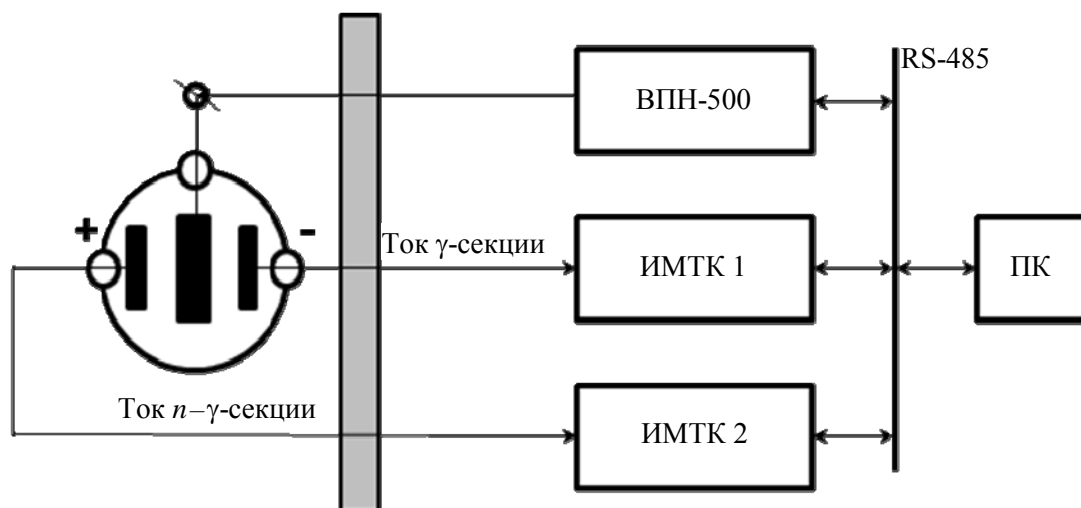


Рис. 3. Схема подключения аппаратуры для МЭР-метра

Заключение

Использование разработанных во ВНИИЭФ аппаратно-программных модулей для построения измерительных каналов, отлаженной библиотеки подпрограмм и визуальных компонентов для управляющего ПО верхнего уровня, применение созданных в институте средств и методик диагностики радиационных полей ИЯУ позволяют существенно упростить и ускорить разработку специализированных систем контроля параметров ионизирующего излучения ИЯУ.

Разработанные во ВНИИЭФ аппаратные и программные средства сводят задачу проектирования таких систем к определению количества каналов регистрации, типа измеряемых физических характеристик и адаптации программы верхнего уровня для решения поставленной задачи. Системы повторяют стандартные измерительные функции обычных приборов и обладают гибкостью для их расширения. При необходимости на одном управляющем компьютере может работать одновременно несколько измерительных программ, делая из него своего рода измерительную лабораторию.

Отображение первичных показаний детекторов и расчетных значений физических параметров ионизирующего излучения в ходе измерений в текстовом и графическом видах позволяет оперативно судить о происходящих физических процессах в ИЯУ и избавляет

от последующей трудоемкой рутинной обработки результатов.

Такие системы мобильны – их аппаратная часть компактна и может быть легко перемещена от установки к установке. В качестве управляющего компьютера может использоваться переносной ПК или стационарный, расположенный на установке.

Список литературы

1. Koshelev A. S., Kovshov K. N., Ovchinnikov M. A., Pikulina G. N., Sokolov A. B. Wide-Range Structurally Optimized Channel for Monitoring the Certified Power of Small-Core Reactors // *Physics of Atomic Nuclei*, 2016, vol. 79, N 8, p. 117–124.
2. Колесов В. Ф., Кувшинов М. И., Воронцов С. В., Смирнов И. Г., Воинов М. А., Девяткин А. А., Кошелев А. С., Нарожный А. Т., Никитин И. А., Хоружий В. Х. Критические стелды и импульсные реакторы РФЯЦ-ВНИИЭФ // 65 лет ВНИИЭФ. Физика и техника высоких плотностей энергии. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2011, вып. 1, 335 с.
3. Кошелев А. С., Хоружий В. Х., Овчинников М. А., Пикулина Г. Н. Особенности формирования секционных токов промышленных ионизационных камер КНК-4, КНК-53М и КНК-15-1 в реакторном поле нейтронов и гамма-квантов // *Ядерная физика и инжиниринг*, 2013, т. 4, № 11–12, с. 1009–1015.

4. Майорников В. С., Овчинников М. А., Пикулина Г. Н., Придчин С. М., Распопов Н. В., Романов М. Б., Гунин С. В., Черкасов А. С., Воинов М. А., Дроздов Ю. М. Цифровая широкодиапазонная аппаратура измерения физической мощности импульсных ядерных реакторов // Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2015, вып. 20, ч. 1, с. 416–421.

5. Бердичевский М. Е. Конструктивы Евромеханики во встраиваемых системах // СТА, 2002, вып. 4, С. 52–59.

6. Самосадный А. В. Набор блочно-модульных решений и методы решения задач построения систем сбора-обработки данных аппаратуры автоматизации физического эксперимента с одновременным количественным контролем параметров // Ядерные измерительно-информационные технологии. 2007, № 3, с. 73–89.

7. Кошелев А. С., Арапов А. В., Овчинников М. А. Диагностические возможности специализированного ОРУК-реактиметра с токовым детектором нейтронов // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов, 2015, вып. 4, с. 39–48.

Контактная информация –

Пикулина Галина Николаевна,
старший научный сотрудник ИЯРФ,
РФЯЦ-ВНИИЭФ,
e-mail: pikulina@expd.vniief.ru

Статья поступила в редакцию 20.06.2018.

Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2018, вып. 4, с. 54–61.