

ПРОГРАММНО-УПРАВЛЯЕМЫЕ КОМПЛЕКСЫ КОНТРОЛЯ ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИЗЛУЧЕНИЯ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ ЯДЕРНЫХ УСТАНОВОК

SOFT-CONTROLLED SYSTEMS AIMED AT CONTROLLING PHYSICAL PARAMETERS OF RESEARCH NUCLEAR FACILITIES RADIATION

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

G. N. Pikulina, M. A. Ovchinnikov, V. A. Yukhnevich, A. S. Koshelev, Yu. M. Drozdov, N. V. Raspopov, V. S. Majornikov, I. M. Piskorskij

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

Russian Federal Nuclear Center –All-Russia Scientific Research Institute of Experimental Physics

В течение последних лет во ВНИИЭФ разработан ряд программно-управляемых комплексов, предназначенных для регистрации и контроля физических параметров излучения исследовательских ядерных установок (ИЯУ). Аппаратная часть комплексов представляет собой набор аттестованных счетных и токовых измерительных каналов, число которых обусловлено конкретной областью применения и решаемыми задачами. Функциональное назначение комплексов определяется управляющим программным обеспечением.

В докладе рассматриваются подходы к проектированию программно-управляемых комплексов как совокупности программных и технических средств с использованием наработанных во ВНИИЭФ методик, приводятся примеры конкретных реализаций аппаратно-программных систем с описанием их функциональных возможностей.

In recent years there have been developed in RFNC-VNIIEF several soft-controlled systems to measure and control physical parameters of research nuclear facilities (RNF) radiation. Hardware of these systems contains count and current certificated measuring channels. The number of channels is specified by the range of application or by the tasks to be solved. The control software determines the systems functionality.

Design approaches and structure concepts for the soft-controlled systems are considered in the report as a combination of software and hardware tools with the developed in VNIIEF techniques. The examples of such systems implementation and description of their functions are discussed.

Во ВНИИЭФ разработаны программно-управляемые комплексы, предназначенные для регистрации и контроля физических параметров излучения исследовательских ядерных установок. Среди разработок есть универсальные многофункциональные системы [1], которые измеряют широкий спектр физических параметров ионизирующего излучения: плотность потока нейтронов, флюенс нейтронов, мощность и суммарное энерговыделение ИЯУ, реактивность, мощность дозы и дозу гамма-излучения и т. д. Также большое распространение получили специализированные программно-аппаратные комплексы, предназначенные для измерения отдельных физических характеристик, или системы, привязанные к специфической конфигурации эксперимента [2]. Рассмотрим подходы к проектированию и принципы построения

таких комплексов, как совокупности программных и технических средств с использованием наработанных во ВНИИЭФ средств и методик диагностики радиационных полей.

Основная задача программно-управляемого комплекса заключается в измерении параметров ядерного излучения во всех режимах работы установки, то есть, в проведении косвенных измерений [3]. Прямые измерения заключаются в регистрации первичных показаний детекторов нейтронного и гамма излучений – в измерении силы тока и скорости счета импульсов в реальном масштабе времени. Физические значения (результаты косвенных измерений) получаются после математической обработки результатов измерений, выполняемой также в реальном масштабе времени.

Для организации токовых и счетных измерительных каналов в качестве базового аппаратного обеспечения во ВНИИЭФ был разработан и изготовлен ряд интеллектуальных модулей различного функционального назначения: измерители тока, измерители скорости счета импульсов, высоковольтные преобразователи напряжения [4]. В таблице приведены типы функциональных модулей и решаемые ими задачи. На все модули получены свидетельства об утверждении типа средств измерений.

Все перечисленные модули являются аппаратно-программными блоками, в состав которых входит микроконтроллер. Они могут объединяться 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 содержит направляющие для установки сменных модулей с размерами печатных плат 3U. Такой крейт можно монтировать в стандартную 19" стойку или использовать в качестве настольного или переносного корпуса [5].

В качестве датчиков, то есть, устройств формирования измерительного сигнала используются детекторы с различными физическими принципами получения сигнала и с разной спектральной чувствительностью. В токовых каналах применяются ионизационные камеры (ИК) типа КГК-2, КНК-15, КНК-53М, КНК-4, вакуумированные детекторы типа ВЭД-2, откаченная камера деления КНК-15-1, в счетных каналах – счетчики детекторов нейтронов типа СНМ и камеры деления КНК-2-7М и КНК-2-8М, используемые в счетном режиме. Тем самым обеспечивается широкий диапазон регистрируемых параметров ионизирующего излучения.

Каждый токовый канал состоит из одного или двух токовых измерительных модулей (ИМТК или ИМТК-Л) и одного модуля высоковольтного преобразователя напряжения (ВПН-500), обеспечивающего питанием токовый детектор. Два токовых измерительных модулей используются для раздельной регистрации секционных токов в схеме однополярного питания по общему для секций электроду токовых камер [2]. В этом случае токовый канал измеряет два токовых сигнала от одного детектора, например, γ -составляющую и $\gamma+n$ -составляющую исследуемого излучения. Счетный

Функциональные модули и их назначение

Задача	Технические характеристики	Тип модуля
Оцифровка токового сигнала	от 10^{-11} до $2.5 \cdot 10^{-3}$ А, Погрешность: (от $1 \cdot 10^{-11}$ до 10^{-8} А) – не более 5 %, (от 10^{-8} до $2.5 \cdot 10^{-3}$) – не более 3 %.	Измерительный модуль токовой камеры ИМТК
	от $5 \cdot 10^{-11}$ до $2.5 \cdot 10^{-3}$ А Погрешность (10^{-11} ÷ 10^{-8} А) – не более 5 %; (10^{-8} ÷ $2.5 \cdot 10^{-3}$ А) – не более 3 %.	Измерительный модуль токовой камеры логарифмический ИМТК-Л
Определение скорости счета импульсов	от 0 до 10^5 имп./с Погрешность (10^2 ÷ 10^5 имп./с) – не более 3%; (0 ÷ 10^2) – не нормируется	Измерительный модуль счетчика нейтронов ИМСН
		Канал измерительный импульсный КИИ (содержит ИМСН и усилитель-дискриминатор импульсного канала)
Обеспечение высокого напряжения	от 100 до 500 В и от –500 до –100 В Выходной ток – не более 5 мА; нестабильность выходного напряжения за 8 часов – не более 1 %	Высоковольтный преобразователь напряжения ВПН-500
	от 100 до 2000 В Выходной ток – не более 1 мА; нестабильность выходного напряжения за 8 часов – не более 1 %	Высоковольтный преобразователь напряжения ВПН-200

канал строится на основе одного КИИ и одного модуля ВПН.

В программно-управляемом комплексе используется ниточная структура построения измерительных каналов, когда каждый канал функционально независим от других. Обработываемые сигналы измерительных трактов гальванически разделены и не влияют на работу друг друга. Канальный принцип организации позволяет быстро и эффективно менять конфигурацию комплекса: изменять число и тип измерительных каналов, – а также производить его обслуживание. Измерение и обмен информацией с другими подсистемами осуществляются с применением средств вычислительной техники: контроллера или компьютера, которые одновременно обеспечивают контроль исправной работы измерительного канала.

Измерительный комплекс строится как многоуровневая система сбора и обработки данных [6]. На данном этапе реализованы трех и четырехуровневые системы. Количество уровней обработки данных в измерительном комплексе определяется его 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 оригинальной архитектурой и персональные компьютеры (ПК), совместимые с какой-либо из стандартных серий (например, с IBM). Пример структуры четырехуровневого измерительного программно управляемого комплекса приведен на рис. 1.



Рис. 1. Структура четырехуровневого измерительного комплекса

Во ВНИИЭФ был разработан микропроцессорный блок обработки данных БОД [4], выпол-

ненный 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.

Встроенное программное обеспечение БОД функционирует под управлением операционной системы реального времени QNX Neutrino 6.5. БОД принимает и обрабатывает результаты первичных измерений (силу тока, скорость счета) от модулей: ИМТК, ИМТК-Л и ИМСН, – выполняет шивку данных в поддиапазонах пересечения (одновременного измерения сигналов от различных детекторов), что позволяет расширить диапазон измерений, выполняет расчет и индикацию значений физических параметров ионизирующего излучения ИЯУ. В ПО БОД предусмотрено редактирование коэффициентов, используемых для вычислений реальных 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, нерабочего состояния. Таким образом БОД может подключаться к СУЗ ИЯУ и использоваться в составе каналов контроля мощности ИЯУ совместно с токовыми и счетными измерительными модулями. Такие комплексы могут работать автономно без подключения к управляющему компьютеру

На основе представленных компонентов базовой аппаратной части во ВНИИЭФ разработаны несколько программно-управляемых комплексов, предназначенных для регистрации и контроля физических параметров излучения ИЯУ. Они различаются по количеству задействованных счетных и токовых измерительных каналов и по количеству используемых иерархических уровней, что обусловлено конкретной областью применения и решаемыми задачами. Главное их отличие заключается в управляющем программном обеспечении (ПО) верхнего уровня, а конкретно – в графическом интерфейсе пользователя, через который производится управление комплексом и в котором отображаются результаты регистрации, и в функциональных возможностях ПО.

При разработке ПО для комплексов контроля физических параметров излучения ИЯУ была сформирована и отлажена библиотека компонентов, обеспечивающих опрос измерительных модулей, обработку и результатов измерений, их архивацию и визуализацию. Поэтому работа по созданию нового комплекса проводится оперативно, не требует много времени на настройку аппаратной и программной частей. Таким образом, с помощью одного и того же аппаратного и программного обеспечения можно быстро разрабатывать надежные системы, выполняющие различные функции и имеющие различный пользовательский интерфейс.

В качестве примеров реализации описанного подхода рассмотрим разработанные во ВНИИЭФ следующие измерительные комплексы: универсальный многоканальный программно-управляемый комплекс «ТОК-СЧЕТ» и специализированные комплексы – МЭР-метр (Мощность, Энергия, Реактивность) и «Реактиметр».

Пользовательский интерфейс программ управления для всех измерительных комплексов проектировался с учетом того, что с ним будут работать специалисты, обслуживающие ИЯУ. От эффективности и надежности работы измерительных комплексов зависят результаты дорогостоящих экспериментов. Поэтому при разработке управляющего ПО учитывались высокие требования к надежности и корректности работы измерительного 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 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.

ПО верхнего уровня измерительного комплекса «ТОК-СЧЕТ», главное окно которого приведено на рис. 2, отображает результаты прямых измерений и расчетные значения в текстовом и графическом видах в реальном масштабе времени. Отображение результатов косвенных измерений в реальном масштабе времени упрощает процесс оценки данных, позволяет оперативно судить о происходящих физических процессах в ИЯУ и избавляет от последующей трудоемкой рутинной обработки первичных показаний.

Зарегистрированные и расчетные данные сохраняются в едином текстовом файле. Такой формат универсален для последующей обработки данных. Файл формируется из отдельных строк. Каждая строка начинается временной меткой – временем измерения. Измеренные и расчетные значения записываются в отдельные столбцы для каждого измерительного канала.

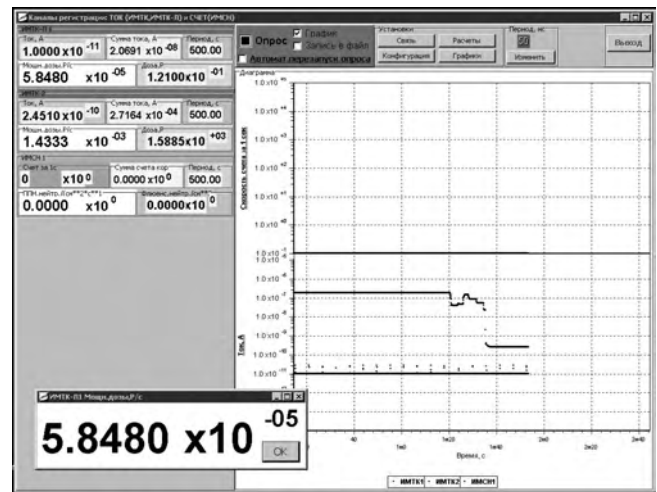


Рис. 2. Главное окно управляющего ПО комплекса «ТОК-СЧЕТ»

МЭР-метр предназначен для получения значений физической мощности, энерговыделения, реактивности ИЯУ в реальном масштабе времени 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 по-

грешность при измерении плотности потока нейтронов [2].

МЭР-метр содержит два токовых канала, используемых для измерения силы тока $\gamma+n$ -составляющей и силы тока γ -составляющей, соответственно. Управляющая программа вычисляет в реальном масштабе времени ток нейтронной составляющей как разность двух токов, по которому далее 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) [2].

Реактиметр используется в целях дополнительного контролирующего и измерительного средства, которое позволяет определять значение реактивности на основе решения обратного уравнения кинетики на всем диапазоне изменения мощности ядерной установки в реальном масштабе времени [7]. В качестве вспомогательного сервиса в управляющей программе предусмотрены вывод первичных показаний детекторов и расчет периода их изменений. При проектировании интерфейса пользователя учитывалось пожелание заказчиков выбирать диапазоны и масштаб для отображения значений реактивности (в $\beta_{эфф}$) в реальном масштабе времени. Пример зарегистрированных данных при помощи комплекса «Реактиметр», приведен на рис. 3.

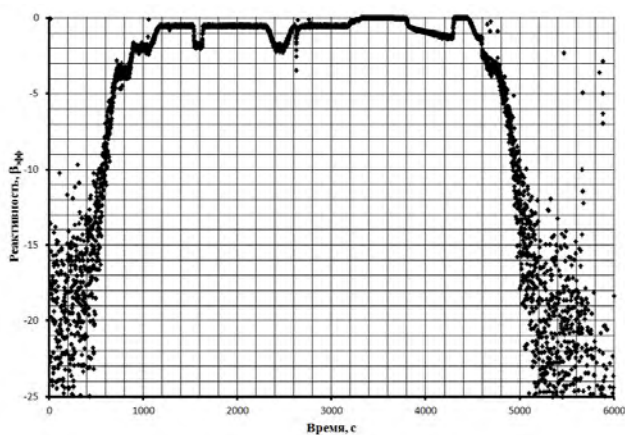


Рис. 3. Результаты регистрации реактивности

Таким образом, разработанные во ВНИИЭФ программно-управляемые комплексы «ТОК-СЧЕТ», МЭР-метр, реактиметр для регистрации и контроля физических параметров излучения ИЯУ

обладают следующими основными 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.

Представление измерительного комплекса в виде совокупности аппаратно-программных модулей, использование отлаженной библиотеки подпрограмм и визуальных компонентов для управляющего ПО верхнего уровня, применение созданных во ВНИИЭФ средств и методик диагностики радиационных полей ИЯУ позволяют существенно упростить и ускорить разработку программно-управляемых комплексов контроля параметров ионизирующего излучения ИЯУ. Разработанные во ВНИИЭФ аппаратные и программные средства сводят задачу проектирования таких комплексов к определению количества каналов регистрации, типа измеряемых физических характеристик и адаптации программы верхнего уровня для решения поставленной задачи. При необходимости, на одном управляющем компьютере может работать одновременно несколько измерительных программ, делая из него своего рода измерительную лабораторию. Такие комплексы 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. No. 8. P. 117–124
2. Кошелев А. С., Хоружий В. Х., Овчинников М. А., Пикулина Г. Н. Особенности формирования секционных токов промышленных иониза-

ционных 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.

3. Ширяев В. В. Компьютерные измерительные средства (КИС): Учебное пособие – Томск: Изд. ТПУ, 2008. С. 190.

4. Майорников В. С., Овчинников М. А., Пиккулина Г. Н. и др. Цифровая широкодиапазонная аппаратура измерения физической мощности импульсных ядерных реакторов // Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2015. Вып. 20, Часть 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 № 3, 2007. С. 73–89

7. Кошелев А. С., Арапов А. В., Овчинников М. А. Диагностические возможности специализированного ОРУК-реактиметра с токовым детектором нейтронов // Вопросы атомной науки и техники, Сер. Физика ядерных реакторов, 2015, Вып. 4, С. 39–48.