

АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС КАНАЛОВ КОНТРОЛЯ МОЩНОСТИ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ ЯДЕРНЫХ УСТАНОВОК

**М. А. Воинов, С. В. Гунин, Ю. М. Дроздов, В. С. Майорников, М. А. Овчинников,
Г. Н. Пикулина, Н. В. Распопов, М. Б. Романов, А. С. Черкасов, В. А. Юхневич**

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

Унифицированный аппаратно-программный комплекс каналов контроля мощности (АПК КKM) – это совокупность аппаратных и программных средств, где реализуются алгоритмы контроля физических параметров исследовательских ядерных установок (ИЯУ): преобразование контролируемых сигналов, выдача управляющих сигналов и обработка регистрируемых данных. Регистрация физической мощности ИЯУ и скорости (периода) ее изменения, осуществляемая в режиме реального времени на основе чтения показаний детекторов нейтронов с различными физическими принципами получения сигнала (газоразрядных счетчиков нейтронов и токовых камер деления) и с различной спектральной чувствительностью, делает АПК КKM полноценным средством контроля работы ИЯУ.

В 2014 году в ИЯРФ завершена разработка АПК КKM, предназначенного для измерения физической мощности и скорости ее изменения на ИЯУ: исследовательских ядерных реакторах, критических и подкритических стендах – в режимах от полностью заглушенного состояния до номинального уровня их мощности. Аппаратно-программный комплекс КKM применяется в составе системы управления и защиты (СУЗ) ИЯУ, расширяя функциональные возможности СУЗ и повышая надежность работы ИЯУ в целом. Диапазон измерения мощности ИЯУ – $(10^{-5} \dots 10^6)$ Вт, диапазон измерения периода изменения мощности – $(1 - 200)$ с.

Ключевые слова: исследовательская ядерная установка, система управления и защиты, аппаратно-программный комплекс, измерительный канал, физическая мощность ИЯУ, период изменения физической мощности, управляющее программное обеспечение.

A COMBINED HARDWARE-SOFTWARE SYSTEM OF CHANNELS FOR POWER CONTROL OF RESEARCH NUCLEAR FACILITIES / M. A. VOINOV, S. V. GUNIN, YU. M. DROZDOV, V. S. MAJORNIKOV, M. A. OVCHINNIKOV, G. N. PIKULINA, N. V. RASPOPOV, M. B. ROMANOV, A. S. CHERKASOV, V. A. YUCHNEVICH // The unitized hardware-software system of channels for power control of research nuclear facilities (HSS PCC) is a combination of hardware and software environment where the algorithms of physical characteristics control of research nuclear facilities (RNF), monitoring signal generation, data processing are implemented. The real time monitoring of nuclear facility physical power and the rate (period) of its variation through reading by neutron detectors of different type with various spectral sensitivities – gas-filled counter tubes and current fission chambers – make the HSS PCC a full-scale means of RNF operation control.

In 2014 there was completed in the INRP the development of HSS PCC aimed at measuring physical power and rate of its variation at RNF (research nuclear reactors, critical and sub-critical test-beds) in the modes from fully damped state to the nominal level of their power. The hardware-software system of PCC is included in the RNF protection and control system; it broadens functional possibilities of the system of protection and control and improves reliability of RNF operation as a whole. The range of physical power control is $(10^{-5} \dots 10^6)$ W, while the range of power variation period control is $(1 - 200)$ sec.

Key words: research nuclear facility, hardware-software system, protection and control system, measuring channel, nuclear facility physical power, rate (period) of power variation, control software.

Введение

В ИЯРФ разработан унифицированный аппаратно-программный комплекс каналов контроля мощности (АПК ККМ), предназначенный для измерения физической мощности и скорости (периода) ее изменения. Он может использоваться на исследовательских ядерных установках (ядерных реакторах, критических и подкритических стендах) во всех режимах работы: от полностью заглушенного состояния до номинального уровня мощности. Аппаратно-программный комплекс ККМ применяется в составе системы управления и защиты (СУЗ) ИЯУ, расширяя функциональные возможности СУЗ и повышая надежность работы ИЯУ в целом. На его основе строятся автоматизированные и измерительные системы для ИЯУ.

АПК ККМ – это совокупность аппаратных и программных средств, где реализуются алгоритмы контроля физических параметров ИЯУ: преобразование контролируемых сигналов, выдача управляющих сигналов и обработка регистрируемых данных.

Регистрация физической мощности ИЯУ и скорости (периода) ее изменения в режиме реального времени на основе чтения показаний детекторов нейтронов с различными физическими принципами получения сигнала (газоразрядных счетчиков нейтронов и токовых камер деления) и с различной спектральной чувствительностью делает АПК ККМ полноценным средством контроля работы ИЯУ [1].

Функциональное назначение и принципы построения АПК ККМ

Основные функции АПК ККМ заключаются в следующем:

- обеспечении питания детекторов нейтронов;
- регистрации первичных параметров;
- преобразовании зарегистрированных данных в расчетные вторичные параметры: физическую мощность ИЯУ, период (скорость) изменения мощности ИЯУ, реактивность ИЯУ;



Рис. 1. Контрольно-управляющий блок АПК ККМ

- анализе расчетных параметров и сравнении их с заданными пороговыми значениями;
- генерации предупредительной сигнализации (ПС) и сигналов аварийной защиты (АС) при выходе расчетных физических значений за пределы установленных порогов;
- проверке и контроле работоспособности канала;
- отображении и сохранении регистрируемых и расчетных физических параметров;
- обеспечении взаимодействия с другими системами.

В АПК ККМ реализована ниточная структура построения каналов, когда каждый канал обладает отдельно нормированными метрологическими характеристиками и функционально не зависит от другого при формировании сигналов защиты и предупреждения.

АПК ККМ обеспечивает круглосуточный режим работы системы.

Каналы АПК строятся по блочно-модульному принципу, где основной структурной единицей является контрольно-управляющий блок (КУБ). КУБ представляет собой крейт, в котором в качестве контроллера с микропроцессорным управлением используется блок обработки данных (БОД). Внешний вид КУБ представлен на рис. 1.

Структура аппаратной части АПК ККМ

В состав каждого канала АПК входят следующие элементы:

- блоки детектирования для регистрации первичных физических характеристик ИЯУ;
- блоки КУБ с различными функциональными модулями;
- линии связи между блоками детектирования и функциональными модулями, между

блоками КУБ и другими системами (СУЗ ИЯУ).

За счет использования КУБ в АПК ККМ реализуется распределенная многоуровневая система измерения и контроля физических параметров ИЯУ. Комплектация АПК ККМ (число и типы детекторов нейтронов и функциональных модулей, количество контрольно-управляющих блоков) определяется особенностями конкретной ИЯУ, где используется АПК ККМ.

В таблице приведены типы функциональных модулей, которые могут использоваться в составе КУБ для формирования АПК, и решаемые ими задачи. Номенклатура обслуживаемых модулей и решаемых задач может расширяться. Дальнейшая обработка зарегистрированных данных при помощи функциональных модулей, управление их работой производится на уровне БОД и его программного обеспечения.

Получены свидетельства об утверждении типа средств измерений на все функциональные модули АПК [2–4], приведенные в таблице.

Крейт КУБ содержит направляющие для установки сменных функциональных модулей с размерами печатных плат 3U. В крейт КУБ может быть установлено до четырех измерительных модулей или преобразователей высокого напряжения. Электрически функциональные модули соединены между собой через переходную панель, на которой установлены части ответных разъемов модулей. Крейт КУБ размещается в стандартной 19" стойке.

В КУБ предусмотрена внутренняя последовательная шина обмена данными в формате RS-485 для организации управления функциональными модулями со стороны БОД. На внутренней шине КУБ БОД является ведущим устройством.

Как уже отмечалось выше, блок обработки данных представляет собой микропроцессорный контроллер, работающий в режиме реального времени. Он функционирует под управлением специально разработанного встроенного программного обеспечения, написанного с использованием языка C++ в операционной системе реального времени семейства QNX. БОД считывает показания измерительных модулей, рассчитывает по полученным данным физическую мощность ИЯУ, период изменения этой мощности, реактивность ИЯУ, контролирует расчетные значения и работу функциональных модулей, отображает результаты расчетов и диагностические сообщения, генерирует сигналы защиты в СУЗ ИЯУ, обменивается информацией с системами управления верхнего уровня.

Каждый КУБ снабжен двумя внешними интерфейсами связи, которые позволяют подключать его через сеть, организованную по стандарту RS-485, к пульту управления верхнего уровня (СУЗ ИЯУ) и дополнительному терминальному устройству одновременно. КУБ является ведомым устройством при его подключении по внешней шине: БОД принимает символьные послышки от терминального устройства или пульта управления СУЗ и формирует ответы.

Функциональные модули и их назначение

Задача	Диапазон	Тип модуля
Оцифровка токового сигнала, А	$10^{-11} - 2,5 \cdot 10^{-3}$	Измерительный модуль токовой камеры ИМТК
	$5 \cdot 10^{-11} - 2,5 \cdot 10^{-3}$	Измерительный модуль токовой камеры логарифмический ИМТК-Л
Определение скорости счета статически распределенных импульсов, имп./с	0 – 10^5	Измерительный модуль счетчика нейтронов
		Канал измерительный импульсный КИИ
Обеспечение высокого напряжения, В	100 – 500; –500...–100	Высоковольтный преобразователь напряжения ВПН-500
	100 – 2000	Высоковольтный преобразователь напряжения ВПН-2000

Таким образом, при работе АПК ККМ мониторинг физической мощности ИЯУ и периода ее изменения, генерация сигналов ПС и АС, контроль работоспособности блоков осуществляются на уровне каждого отдельного прибора (КУБ – нижний уровень контроля), а также на верхнем уровне – в пульте управления СУЗ. В АПК ККМ реализован принцип распределенного управления, когда каждый прибор способен самостоятельно выполнять функции управления, независимо от состояния всей системы.

Реализация АПК ККМ для реактора ГИР-2М

В настоящее время вариант АПК ККМ смонтирован и введен в эксплуатацию на исследовательском ядерном реакторе ГИР-2М [5].

АПК ККМ для ГИР-2М состоит из двух независимых равноценных каналов (НК), которые выполняют одинаковые измерительные и информационные функции, управляющие функции безопасности и нормальной эксплуатации ГИР-2М во всех режимах его работы. Структурная схема системы АПК ККМ для ГИР-2М представлена на рис. 2.

Каждый НК содержит следующие компоненты:

– КУБ-ТС (токовый и счетный каналы измерения) для опосредованного измерения фи-

зической мощности ИЯУ во всем диапазоне ее изменения и скорости этого изменения по плотности потока нейтронов, в состав которого входят функциональные модули: ИМСН, два модуля ИМТК-Л, ВПН2000 и ВПН500;

– КУБ-Т1 (токовый канал) для опосредованного измерения физической мощности ИЯУ и контроля измеренного значения с выдачей ПС и АС при достижении пороговых уставок по мощности, в состав которого входят функциональные модули: ИМТК-Л, два модуля ВПН-500;

– КУБ-Т2 (токовый канал) для опосредованного измерения периода изменения мощности ИЯУ и контроля измеренного значения с выдачей ПС и АС при достижении пороговых уставок по периоду, в состав канала входят функциональные модули ИМТК-Л и ВПН-500;

– четыре подвески камеры деления КНК15-1 (ПКД15-1), которые обеспечивают преобразование плотности потока нейтронов в точках размещения ИК в выходные электрические сигналы;

– подвеска счетчиков нейтронов СНМ11 (ПСН11), которые обеспечивают преобразование плотности потока нейтронов в точках размещения счетчиков нейтронов в выходные электрические сигналы – статистически распределенные импульсы.

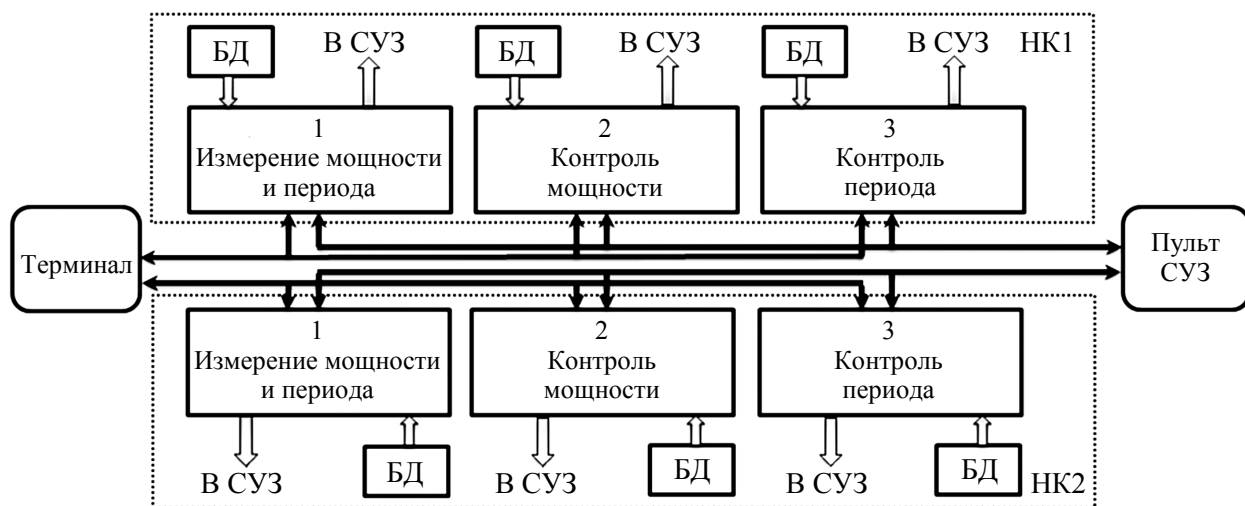


Рис. 2. Структурная схема АПК ККМ для ГИР-2М (БД – блок детектирования; НК1, НК2 – независимые измерительные каналы)

Каждый КУБ, входящий в состав АПК, подключен через внешний интерфейс связи в стандарте RS-485 к пульту управления СУЗ. Также обеспечена передача сформированных в приборах КУБ-Т релейных сигналов АС, ПС, НС (типа «сухой контакт») непосредственно в СУЗ реактора.

Управляющее программное обеспечение АПК ККМ

Для комплексной проверки работоспособности АПК ККМ для ГИР-2М и дополнительного мониторинга физических параметров в состав системы входит терминальное устройство, выполненное на основе промышленной станции. Управляющее ПО терминального устройства разработано в среде визуального объектно-ориентированного программирования DELPHI и функционирует под управлением операционной системы MS Windows [6]. ПО используется при отладке системы, вводе ее в опытную эксплуатацию, проведении технического обслуживания и поверке каналов, для тестирования аппаратной части каналов.

Основные функции управляющего ПО заключаются в следующем:

- обмену данными между терминальным устройством и аппаратурой АПК ККМ;

- программировании контрольно-управляющих блоков (КУБ) и входящих в их состав функциональных модулей, проверке работоспособности комплекса;

- задании предупредительных и аварийных уставок по уровню физической мощности ИЯУ и периоду ее изменения;

- чтении показаний функциональных модулей (силы тока от блоков детектирования и средней скорости счета статистически распределенных импульсов, зарегистрированных счетчиками нейтронов) и сохранении их в файлах;

- чтении расчетных значений (физической мощности ИЯУ, периода изменения мощности, реактивности) и сохранении их в файлах;

- представлении на экране терминального устройства считанных показаний в текстовом и графическом видах;

- настройке режимов работы высоковольтных преобразователей напряжений (ВПН) для обеспечения питания ионизационных камер и счетчиков нейтронов;

- контроле генерации предупредительной и аварийной сигнализации и сигналов «нерабочего состояния».

Пример результатов регистрации скорости счета и силы тока прибором КУБ-ТС из состава АПК ККМ, выполненной с использованием ПО терминального устройства, представлен на рис. 3. Счетчик и камера помещались в полиэтиленовые замедлители и располагались

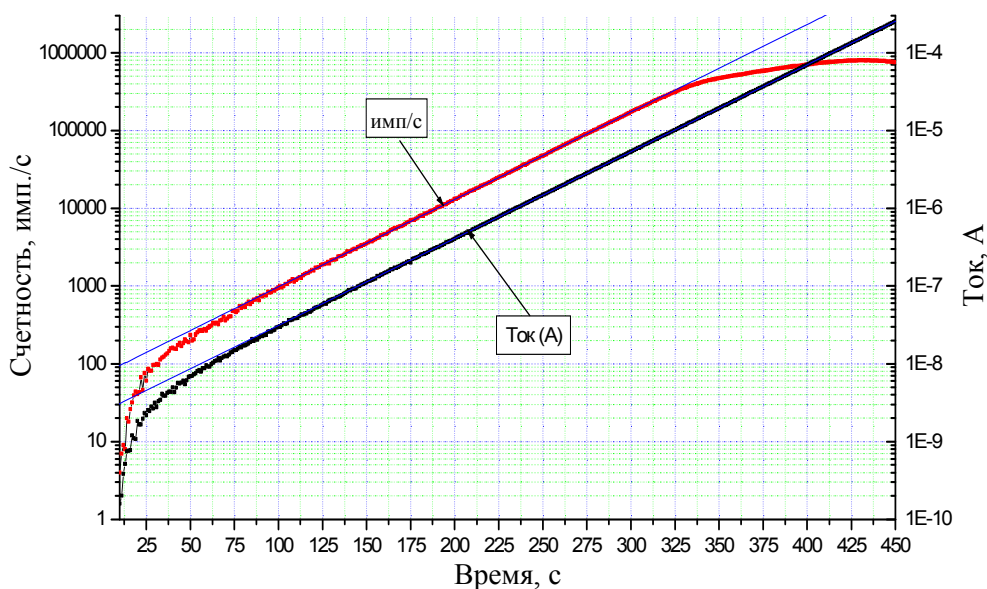


Рис. 3. График изменения скорости счета счетчика и тока камеры при увеличении мощности реактора ГИР-2М ($T_{\text{счет}} = 38,6$ с; $T_{\text{ток}} = 38,88$ с; $T_{\text{штат}} = 38,9$ с)

на расстоянии 1 м от активной зоны реактора. Реактор ГИР-2М работал в режиме набора мощности с постоянным периодом. В этом режиме плотность потока нейтронов, регистрируемая детекторами, возрастала экспоненциально во времени.

Заключение

Практически безынерционная реакция на изменение физических параметров реактора, получаемая от АПК ККМ, сделала этот комплекс основным средством управления работой реактора ГИР-2М, обеспечивающим его безопасную эксплуатацию во всех режимах. Испытания системы в составе СУЗ ГИР-2М подтвердили качественное и надежное выполнение всех ее функций. АПК ККМ для ГИР-2М обеспечивает контроль физической мощности, периода и реактивности во всем диапазоне изменения мощности в соответствии с заданными условиями при круглосуточном режиме работы:

- время цикла измерения первичных данных в КУБ – от 8 до 11 мс;
- диапазон измерения силы тока – от $1,0 \cdot 10^{-11}$ до $2,5 \cdot 10^{-3}$ А;
- диапазон измерения скорости счета – от 0 до $1 \cdot 10^5$ имп./с;
- диапазон опосредованного измерения физической мощности – от $5 \cdot 10^{-5}$ до $3 \cdot 10^6$ Вт;
- диапазон измерения периода (изменения мощности в e раз) – от 1 до 200 с.

АПК ККМ обеспечивает мониторинг физических параметров ИЯУ, генерацию сигналов ПС и АС, контроль работоспособности на уровне каждого отдельного прибора КУБ (нижний уровень контроля), на верхнем уровне – в пульте управления СУЗ. В АПК ККМ каждый КУБ самостоятельно выполняет функции управления независимо от состояния всей системы.

Характеристики и основные свойства АПК ККМ открывают перед проектировщиками СУЗ или других автоматизированных и измерительных систем для ИЯУ новые возможности, позволяющие существенно повы-

сить эффективность проектирования и снизить его трудоемкость.

Авторы выражают благодарность специалистам и сотрудникам ВНИИЭФ, принимавшим участие в разработке и тестировании АПК ККМ.

Список литературы

1. Шикалов В. Ф., Журбенко А. В., Кужиль А. С., Козлова Л. В. Физическое разноеобразие при формировании сигналов аварийной защиты по нейтронно-физическим параметрам для АЭС с ВВЭР // Ядерная и радиационная безопасность, 2010, 4(48), с. 6–10.
2. Свидетельство об утверждении типа средств измерений на измерительный модуль токовой камеры (ИМТК) № 39607 RU.E.38.046.A.
3. Свидетельство об утверждении типа средств измерений на высоковольтный преобразователь напряжения (ВПН) № 39606 RU.E.38.046.A.
4. Свидетельство об утверждении типа средств измерений на измерительный модуль счетчика нейтронов (ИМСН) № 39605 RU.E.38.046.A.
5. Воинов М. А., Кувшинов М. И., Колесов В. Ф. и др. Импульсный реактор ГИР-2 для модернизированного облучательного комплекса ЛИУ-10М – ГИР-2 // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов. 1991. Вып. 1. С. 3–7.
6. Архангельский А. Я. Delphi 2006. Справочное пособие: Язык Delphi, класс, функции Win32 и NET. – М: ООО «Бином-пресс», 2006. 1152 с.

Контактная информация –

Пикулина Галина Николаевна,
старший научный сотрудник ИЯРФ,
РФЯЦ-ВНИИЭФ,
e-mail: otd4@expd.vniief.ru

Статья поступила в редакцию 16.06.2017.

Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2017, вып. 4, с. 123–128.