

АППАРАТУРА КОНТРОЛЯ НЕЙТРОННОГО ПОТОКА В ПРОЕКТЕ НОВОВОРОНЕЖСКОЙ АЭС-2

И.А. Сергеев*, В.А. Горбаев, Д.В. Терехов*****

* ООО «СКУ-Атом»

123060, Москва, ул. Расплетина, д. 24

** НИЦ Курчатовский институт

123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1

*** Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская атомная станция»
396072, Воронежская обл., г. Нововоронеж, Промышленная зона Южная, 1



Разработано новое поколение аппаратуры контроля нейтронного потока (АКНП) для применения в составе реакторных установок (РУ) поколения 3+ проекта АЭС-2006. Аппаратура вошла в состав СУЗ на энергоблоках Нововоронежской АЭС-2. Применены программные и аппаратные усовершенствования, позволившие улучшить показатели надежности, диагностики, удобства обслуживания и метрологические характеристики, что позволило сделать вывод о повышении безопасности. Разработка и реализация новой АКНП основаны на принципах соблюдения требований и рекомендаций современной российской и международной нормативно-технической документации, учета опыта создания и эксплуатации аналогичных систем, всеобъемлющей верификации и валидации, соответствия требованиям по интеграции системы в проект АСУ ТП энергоблоков нового поколения, обеспечения высокого уровня качества и надежности, соблюдения принципов культуры безопасности. Аппаратура введена в промышленную эксплуатацию на энергоблоке № 1 НВАЭС-2. Приведены основные принципы построения АКНП, описаны инновационные и консервативные (традиционные) решения, принятые при создании аппаратуры. Затронуты вопросы проблематики ввода АКНП в эксплуатацию. Приведены отдельные результаты анализа функционирования АКНП во время основных стадий физического и энергетического пуска. В процессе пусковых операций и во время опытно-промышленной эксплуатации было подтверждено соответствие АКНП требованиям проекта, нормативных документов, получены удовлетворительные точностные характеристики и подтверждено удобство обслуживания.

Ключевые слова: реакторная установка, безопасность, АКНП, нейтронный поток, мощность реактора, детектирование плотности нейтронного потока, измерительный канал, корректировка показаний мощности.

ВВЕДЕНИЕ

При создании ядерных энергетических установок АЭС огромную роль играет обеспечение их безопасной эксплуатации. Ключевой задачей при проектировании РУ с точки зрения безопасности является необходимость обеспечения их быстродействующими системами управления и защиты. Требования к быстродействию таких систем связаны

© И.А. Сергеев, В.А. Горбаев, Д.В. Терехов, 2017

со свойствами активных зон реакторов ВВЭР, работающих на тепловых нейтронах, и относительной инертностью контрольно-измерительной аппаратуры. В связи с этим были созданы системы, контролирующие мощность реакторов и скорость ее увеличения при помощи регистрации нейтронов, покидающих активную зону в ходе цепной реакции деления, в дальнейшем получившие название систем (аппаратур) контроля нейтронного потока (АКНП). Сегодня АКНП играет важнейшую роль в обеспечении безопасной эксплуатации и надежного управления энергоблока.

В 2009 г. ОАО «ВНИИАЭС» поручило ООО «СКУ-Атом» разработку нового поколения АКНП для АЭС-2006, которая велась с учетом

– повышенных требований в части безопасности и надежности, для удовлетворения которых были реализованы следующие решения:

- применение структуры системы с увеличенным количеством измерительных каналов АКНП (двухкомплектная четырехканальная структура);

- обеспечение соответствия современным нормативным требованиям, в частности, ГОСТ Р МЭК (IEC) 60880, ГОСТ Р МЭК (IEC) 62138, ГОСТ Р МЭК (IEC) 61513, ГОСТ Р МЭК (IEC) 60987, чему уделялось особое внимание в связи с тем, что данный проект рассматривался как референтный при создании энергоблоков АЭС, которые будут сооружаться ГК «Росатом», в том числе на зарубежных площадках;

- применение современных алгоритмов обработки сигналов, существенно улучшающих метрологические и диагностические характеристики измерительных каналов;

- внедрение современного алгоритма автоматической корректировки показаний мощности, учитывающего специфические свойства активной зоны, сильные изменения нейтронного потока в процессе протекания динамических процессов, совмещенные с ксеноновым и йодным отравлением активной зоны [11];

– специфических свойств проекта энергоблока с РУ В-392, в частности,

- уменьшенное по сравнению с проектами РУ с ВВЭР-1000 количество каналов ионизационных камер (ИК);

- необходимость применения неперемещаемых блоков детектирования;

- размещение предусилителей сигналов блоков детектирования на значительном удалении от самих блоков в помещениях каналов безопасности в межоболочечном пространстве.

Новое поколение АКНП получило наименование АКНП-01 [12]. В 2010 г. было начато изготовление опытного образца, на котором был проведен весь комплекс испытаний, и производство поставочного комплекта АКНП-01 для оснащения энергоблока № 1 НВАЭС-2.

СТРУКТУРА АКНП И ЕЕ ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ПРОЕКТУ АЭС-2006

Принцип функционирования измерительного канала АКНП достаточно прост и может быть представлен в виде схемы (рис. 1).

Блоки детектирования плотности потока нейтронов

Особенностью АКПН является то, что она осуществляет контроль мощности РУ в очень широком диапазоне. В соответствии с требованиями [1] должен быть обеспечен контроль плотности нейтронного потока в активной зоне в диапазоне мощности от 10^{-7} до $120\% N_{\text{ном}}$ ($N_{\text{ном}}$ – номинальное значение мощности реакторной установки). Для проекта НВАЭС-2 требования по диапазону контроля мощности были расширены – от 10^{-9} до $150\% N_{\text{ном}}$ [2]. Поэтому одной из основных задач является разработка детекторов плотности нейтронного потока (БДПН), позволяющих надежно контролировать плотность нейтронного потока в большом диапазоне его изменения на этапе 1 (см. рис. 1). Другой особенностью является способ размещения указанных детекторов: в силу ряда причин (спектр регистрируемых нейтронов, гамма-фон, параметры среды в местах разме-

нения) исторически был выбран вариант, при котором детекторы (блоки детектирования) нейтронного потока размещаются в вертикальных каналах в биологической защите вне корпуса реактора (называемых каналами ИК).



Рис. 1. Иллюстрация принципа функционирования канала АКНП

В серийных проектах РУ с реакторами ВВЭР-1000 рядом с каналами ИК размещалось помещение ионизационных камер, в котором осуществляется обслуживание самих детекторов (БДПН), устанавливаются механизмы перемещения БДПН для их удаления из зоны с высокой плотностью нейтронного потока во время работы на энергетических уровнях мощности с целью исключения их выгорания. В этом же помещении устанавливались блоки предусилителей сигналов БДПН для передачи сигналов по длинным линиям связи (этап 2, рис. 1).

В проекте РУ АЭС-2006, в котором не предусмотрено наличие такого помещения вследствие применения элемента управления запроектными авариями (ловушки расплава активной зоны), возникла необходимость применения неподвижных БДПН, обеспечивающих контроль на низких уровнях мощности в диапазоне источника (ДИ) и при перегрузке топлива. Использовались борные радиационно стойкие счетчики CPNB44 фирмы Photonis, Франция, зарекомендовавшие себя в процессе их применения в составе АКНП в проектах ряда зарубежных АЭС. Счетчики CPNB44 совместно с предусилителем обеспечивают максимальную чувствительность в импульсном режиме на уровне 8 имп/нейтр-см². Это позволило выполнить требование проекта энергоблока в части применения неподвижных блоков детектирования. Для дополнительной защиты блоков детектирования ДИ от выгорания был реализован алгоритм их автоматического отключения при выходе на более высокие уровни мощности при переключении в рабочий диапазон.

Необходимо отметить, что из-за невозможности размещения предусилителей в непосредственной близости от БДПН до 200 – 250 м были увеличены длины кабелей блоков детектирования, и появились две точки их «разрыва»: в прямых ИК в реакторном зале (технологический переход с кабеля блока детектирования на магистральный кабель) и на гермопроходке (при переходе из гермообъема в межбололочное пространство, в котором размещены предусилители). Данное свойство проекта энергоблока являлось коренной причиной возникновения помех на некоторых линиях связи в процессе ПНР. Информация о примененных в проекте НВАЭС-2 БДПН дана в табл. 1.

На рисунке 2 приведена схема размещения БДПН АКНП-01 по высоте в каналах ИК (блоки детектирования внутриреакторной системы контроля перегрузки топлива не показаны). Каждый канал АКНП-01 имеет в своем составе так называемую «гирлянду» БДПН пускового и рабочего диапазонов, а также или один БДПН-04 (контроль плотности потока нейтронов при физическом пуске – функция АФП), или блок детектирования диапазона источника и СКП. Существенным фактором, ограничивающим степени свобо-

ды при принятии решения по структуре АКНП и размещению БД, являлось то, что по сравнению с ВВЭР-1000 (проект В-320) было существенно уменьшено количество каналов ИК – с 24 до 16 штук. При этом два канала ИК (№ 8 и 16) заняты блоками детектирования аппаратуры физического пуска, а количество измерительных каналов АКНП было увеличено до 8 шт.

Таблица 1

Применяемые в АКНП-01 блоки детектирования плотности нейтронного потока

Поддиапазон контроля мощности	Тип камеры	Наименование БДПН	Диапазон контроля мощности требуемый, %	Диапазон контроля мощности полученный, %	Перекрытие диапазонов требуемое, десятичных порядков	Перекрытие диапазонов полученное, десятичных порядков
Физпуск (АФП)	Три счетчика СМН-18	БДПН-04	$1 \cdot 10^{-10} - 1 \cdot 10^{-5}$	$\sim 5 \cdot 10^{-11} - 1,1 \cdot 10^{-5}$	-	-
Источник (ДИ/СКП)	Борный счетчик	СРNB44	$1 \cdot 10^{-9} - 1 \cdot 10^{-4}$	$\sim 2 \cdot 10^{-11} - 1,6 \cdot 10^{-4}$	ДИ – ПД: 1	ДИ – ПД: 2
Пусковой/рабочий линейный (ПД/РД2)	КНК-15	БДПН-01-01	$1 \cdot 10^{-7} - 1 \cdot 10^{-2} / 1 \cdot 10^0 - 1,5 \cdot 10^2$	$\sim 8 \cdot 10^{-8} - 1 \cdot 10^{-1} / 1 \cdot 10^{-1} - \dots$	ПД – РД1: 1	ПД – РД1: 2,5
Рабочий логарифмический (РД1)	КНК-17	БДПН-05	$1 \cdot 10^{-3} - 1,5 \cdot 10^2$	$\sim 5 \cdot 10^{-5} - \dots$		

Примечание. Информация о блоках детектирования внутриреакторной системы контроля перегрузки топлива (СКП) не приведена

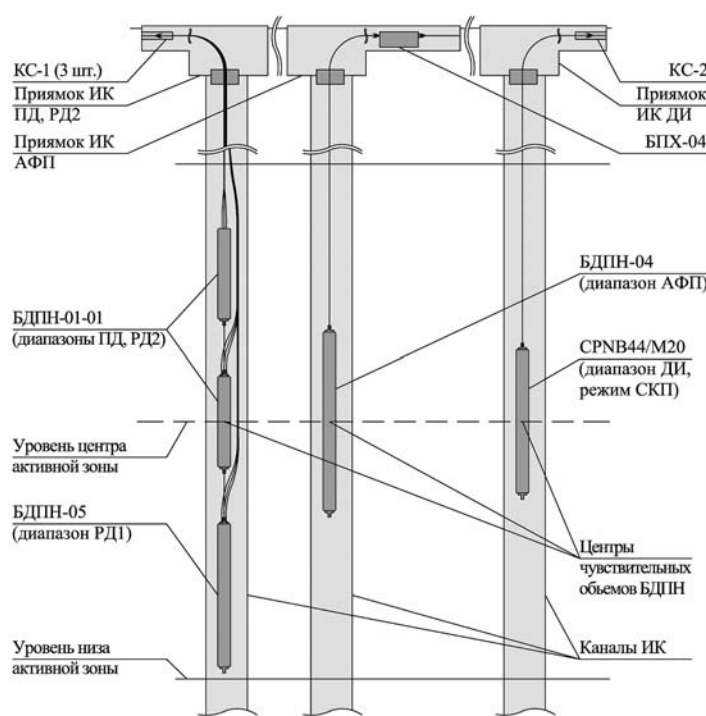


Рис. 2. Схема размещения БДПН АКНП в каналах ИК

Таким образом, было найдено решение для выполнения требования проекта АЭС-2006 по размещению БДПН при ограниченном количестве каналов ИК и сохранении обеспечения надежного контроля реактора по нейтронно-физическим параметрам.

Четырехканальная двухкомплектная структура АКНП

Блоки детектирования АКНП, ввиду особенностей их размещения, обеспечивают контроль лишь небольшого участка объема активной зоны [15], прилегающего к каналу ИК, при этом максимальный вклад в показания (85 – 90%) обеспечивают ТВС крайнего слоя, 10 – 15% сигнала обеспечиваются ТВС второго слоя и лишь около 1% – третьего слоя. Увеличение количества каналов контроля, повлекшее за собой увеличение плотности размещения блоков детектирования нейтронного потока, а следовательно, и уменьшение площади зон, менее контролируемых БДПН, вызвано следующими причинами.

При проведении некоторых видов испытаний в процессе энергопусков блоков АЭС с ВВЭР было выявлено, что при возникновении локальных неравномерностей энерговыделения в активной зоне происходит непроектный рост мощности и периода в определенном секторе активной зоны, который ввиду приведенных выше причин может быть зафиксирован только одним каналом комплекта. При этом не произойдет формирования сигналов управления и защиты при наличии условий к их срабатыванию. Такое несрабатывание вызвано применением схемы «2 из 3» в логической схеме иницирующей части управляющей системы безопасности. Этот эффект был обнаружен при проведении ПНР на пятом блоке АЭС «Козлодуй», когда непроектное отключение ГЦН и его последующее включение сразу после разгрузки реактора в нарушение регламента вызвало достижение уставок срабатывания аварийной защиты по повышению плотности нейтронного потока только в канале, наиболее приближенном к патрубкам подключаемой петли, и не сопровождалось формированием исполнительного сигнала аварийной защиты. Нарушение режима подключения неработающей петли в совокупности с превышающим допустимые величины ксеноновым возмущением в активной зоне при последующих испытаниях привели к повышению активности теплоносителя в первом контуре, но срабатываний схем защиты и управления по нейтронно-физическим параметрам не произошло. Повышение активности было связано с возникновением дефекта типа газовой неплотности твэлов. Увеличение количества измерительных каналов, приведшее к увеличению плотности размещения БДПН АКНП, снижает вероятность пропуска срабатывания защит по сигналам, формируемым АКНП при локальных возмущениях нейтронного потока вследствие изменения параметров одной из петель, снижает вероятность пропуска событий в случае режимов с «выбросом» ОР СУЗ. Увеличение количества каналов позволило также унифицировать подходы к формированию защит в проектах АЭС-2006, разрабатываемых как для НВАЭС-2, так и для Ленинградской АЭС-2, проектом которой предусмотрено четырехканальное исполнение защит в СУЗ для всех основных параметров РУ [3].

С учетом необходимости обеспечения равномерности покрываемого объема контроля была выбрана схема азимутального размещения БДПН [14] с привязкой каналов контроля к циркуляционным петлям, в которых размещены датчики температуры теплоносителя, показания которых используются в алгоритмах автоматической корректировки показаний мощности.

ХАРАКТЕРИСТИКИ АППАРАТНОЙ И АЛГОРИТМИЧЕСКОЙ ЧАСТЕЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КАНАЛОВ АКНП

Предварительные усилители сигналов БДПН

Прием сигналов блоков детектирования, их обработку, помехоподавление, нормировку, усиление и передачу в устройства накопления и обработки (УНО) на этапе 2 (см. рис. 1) осуществляют предварительные усилители БПХ, размещаемые в помещениях систем безо-

пасности в межбололочном пространстве. БПХ также осуществляют питание блоков детектирования и обеспечивают возможность настройки показаний БДПН в широком диапазоне. Регулировка осуществляется по параметрам гамма-компенсации, дискриминации шумовых импульсов, коэффициентов преобразования «ток-частота».

Предусилители БПХ – это первая ступень обработки сигналов блоков БДПН, обеспечивающая процесс настройки показаний каналов АКНП – так называемую «сшивку» диапазонов контроля [4]. Тонкая настройка для сшивки диапазонов обеспечивается в УНО АКНП. Сшивка показаний диапазонов контроля является важнейшей обязательной процедурой при первом выходе на минимальный контролируемый уровень мощности (МКУ), которая позволяет обеспечить безударное автоматическое переключение диапазонов контроля между собой, привести их показания в соответствие друг другу, обеспечивая операторов и зависимые системы единым значением мощности во всем диапазоне, контролируемом АКНП. Сшивка диапазонов контроля проводится в связи с тем, что при первом пуске появляется впервые регистрируемый БДПН АКНП нейтронный поток, значительно зависящий от геометрических характеристик каналов ИК, их расположения в биологической защите РУ, влияния на показания элементов конструкции РУ и точек реального расположения БДПН. Сшивка обеспечивается приведением показаний нижнего диапазона – диапазона источника (ДИ) – к опорному значению, в качестве которого были выбраны показания аппаратуры физического пуска (АФП) в составе каналов АКНП, и последующему приведению остальных диапазонов в соответствие друг другу. Также проверяются и, при необходимости, корректируются границы переключения диапазонов контроля между собой.

На рисунках 3, 4 приведена иллюстрация показаний измерительного канала АКНП-01 во время выхода на МКУ мощности первого энергоблока Нововоронежской АЭС-2 после проведения сшивки диапазонов контроля. Как видно, обеспечено плавное переключение диапазонов между собой – диапазоны обеспечивают необходимое перекрытие друг друга во всем проектном диапазоне.

Как видно из рис. 3, при подъеме мощности и переключении канала контроля в диапазон РД1 происходит автоматическое отключение питания БДПН диапазона источника. Функциями автоматической диагностики это отключение идентифицируется как неисправность второго класса и приводит к формированию сигнала аварийной защиты по принципу «безопасного отказа». Однако логические алгоритмы обеспечивают блокировку этого сигнала по признаку наличия сигнала начала пускового диапазона.

В процессе первого вывода РУ блока № 1 НВАЭС-2 в критическое состояние и последующего достижения МКУ в результате нарушения порядка настройки оборудования АКНП по реальным показаниям произошло отключение БДПН диапазона источника из-за формирования сигнала начала рабочего диапазона при отсутствии блокировки по началу пускового диапазона. Это привело к формированию сигналов аварийной защиты в каналах АКНП и к аварийному останову РУ. Следующие причины определили это событие:

- БДПН пускового диапазона расположен напротив верхней части активной зоны (см. рис. 2) и находится в «тени» опорной консоли реактора, а БДПН диапазона РД1 – напротив нижней части активной зоны, в области более высокой плотности нейтронного потока; эта неравномерность должна быть нивелирована при настройке измерительных каналов АКНП в процессе первого выхода в критическое состояние и на МКУ мощности;

- на стадии наладочных работ в процессе подавления помех на линиях связи БДПН-БПХ при подготовке к выходу в критическое состояние граница перехода «диапазон источника - пусковой диапазон» была сильно завышена для фильтрации возможных ложных срабатываний из-за помех, однако в процессе пуска предполагалась переустановка значения этой границы по реальным показаниям. Граница перехода «пусковой - рабочий диапазон» находилась на низком значении, установленном при изготовлении оборудования.

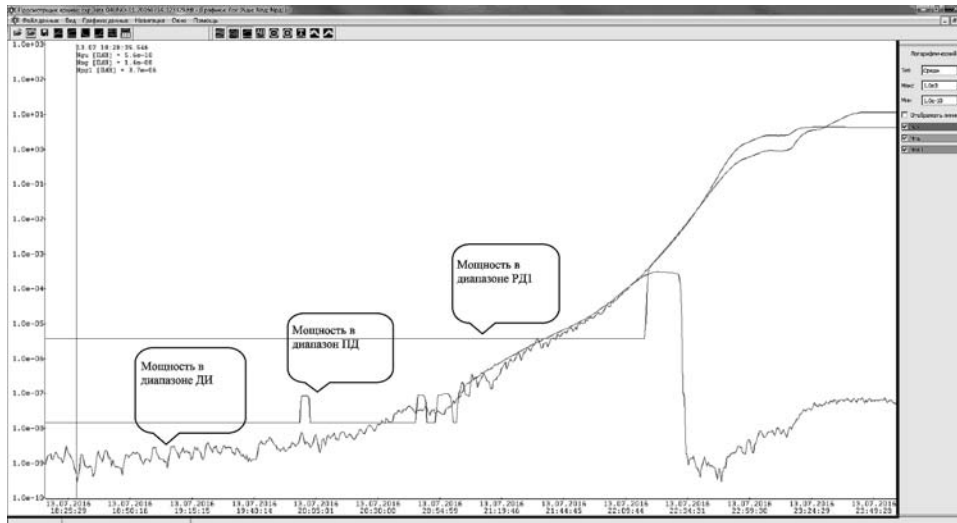


Рис. 3. Иллюстрация показаний измерительного канала АКНП при выходе на МКУ по отдельным диапазонам контроля

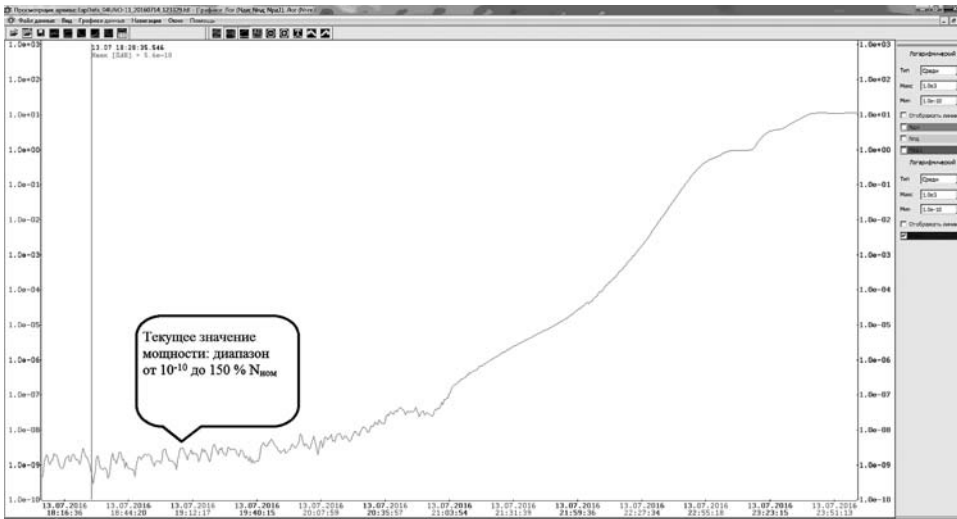


Рис. 4. Иллюстрация показаний измерительного канала АКНП при выходе на МКУ, результирующее значение мощности

Отсутствие в программе достижения МКУ процедуры стабилизации мощности, соответствующей работе АКНП в диапазоне источника в целях проведения настройки измерительных каналов АКНП и сшивки каналов, не позволило своевременно устранить влияние указанных причин в процессе ПНР. В дальнейшем была проведена процедура сшивки диапазонов штатными средствами АКНП, и предпосылки к повторению данной ситуации были устранены.

Устройства накопления и обработки измерительных каналов АКНП

Нормированный и усиленный сигнал, пропорциональный плотности нейтронного потока, передается в шкафы накопления и обработки информации УНО. Каждый шкаф представляет собой основное звено измерительного канала, в котором осуществляются расчеты значений плотности нейтронного потока, относительной мощности реактора, периода (скорости) изменения мощности, реактивности. В УНО формируются сигналы защиты и управления, осуществляется передача этих сигналов в иницирующую часть УСБ и другие системы, выдача информации на щиты управления и на верхний блочный

уровень (через шлюзовые устройства) и выполняются многие другие функции, в том числе диагностика всех элементов измерительного канала. При помощи органов человеко-машинного интерфейса в УНО осуществляются все основные настройки измерительного канала, представляются результаты самодиагностики оборудования.

Поскольку УНО осуществляет обработку большого массива информации, выполняет сложные математические операции, а также формирует сигналы защиты и управления, к его функционированию предъявляются жесткие требования по быстродействию, отказоустойчивости, метрологическим характеристикам, глубине диагностирования [2, 4].

При разработке аппаратно-программной платформы УНО в составе АКНП-01 основной упор был сделан на следующих основных аспектах.

- **Безопасность и надежность:**

- реализована многоканальная независимая структура АКНП;
- обеспечено соответствие современным требованиям [6, 7] в области применения ПО (были проведены комплекс процедур верификации и валидации, анализ устойчивости к отказам по общим причинам, реализовано разнообразие расчетных кодов и программного обеспечения в соответствии с рекомендациями [9], введен всеобъемлющий контроль состояния, контроль версий и целостности ПО, аппаратный контроль функционирования [8], исключен доступ к ПО и т. д.);

- реализованы дублирующие цепочки расчета мощности и формирования сигналов защиты и управления на непрограммируемых средствах;

- применены цифровые интерфейсы, позволяющие достигать высокие показатели по помехозащищенности, осуществлять обмен с удаленными устройствами по более длинным линиям связи, а также расширить диагностические возможности оборудования.

- **Глубокая самодиагностика:** контроль исправности и параметров функционирования, начиная от значений входных параметров каждого модуля, выходных сигналов канала и контролируемых характеристик и заканчивая технологической информацией, такой как счетчики ошибок обмена информацией, версий и кодов конфигураций и ПО, температурой модулей (всего около 500 контролируемых параметров на каждый канал). Это позволило существенно снизить время локализации и устранения неисправностей.

- **Внутренняя и межсистемная унификация аппаратной части оборудования.**

- **Удобный и надежный человеко-машинный интерфейс:**

- каждый канал АКНП содержит рабочую станцию, на которую выводится обобщенная и детальная информация о функционировании канала, осуществляется архивирование и реализована возможность оперативного вывода информации в виде графиков;

- реализованы автоматизированные режимы проверки работоспособности, сокращающие время регламентного обслуживания оборудования с представлением результатов проверок и на экране канала, и в виде файлов для обработки на удаленном ПК;

- исключены механические органы управления – снижена вероятность отказов, а также реализована защита от несанкционированного доступа и ошибочной параметризации каналов (реализованы процедуры аутентификации, контроля и подтверждения записи настроек).

- **Улучшенные метрологические характеристики, обеспечиваемые применением**

- высокоточных аналоговых и цифровых преобразователей;

- скоростных интерфейсов обмена;

- широкого набора алгоритмов тонкой настройки с высоким разрешением и функций параметризации измерительных цепочек;

- современного алгоритма корректировки показаний мощности, выполненного на базе аттестованной модели кинетики реакторной установки. В АКНП наряду с традиционными причинами, влияющими на показания мощности АКНП, такими как температура теплоносителя и положение органов регулирования системы управления и защиты (ОР СУЗ),

учитывается фактор остаточного энерговыделения, а также реализован алгоритм учета воздействия ксенонового и йодного отравления активной зоны на показания АКНП.

Алгоритм автоматической корректировки показаний мощности

АКНП осуществляет контроль нейтронного потока во всех режимах работы реакторной установки, однако наименьшая погрешность вычисления мощности должна быть достигнута при работе на энергетических уровнях мощности для обеспечения соответствия требованиям к точности регулирования. Для этого в составе АКНП предусмотрено наличие алгоритма корректировки показаний мощности (АКПМ), работа которого осуществляется в рабочем линейном диапазоне РД2 (уровень мощности свыше 10% от номинальной мощности $N_{ном}$). Установленное требование к погрешности вычисления мощности измерительными каналами АКНП-01 – 1% от $N_{ном}$ в стационарных и квазистационарных режимах и 2 – 3% в динамических режимах.

В существовавших алгоритмах автоматической корректировки мощности в АКНП применялись принципы корректировки при введении поправочных коэффициентов на основе отдельных линейных зависимостей от факторов, влияющих на значение мощности АКНП, вычисляемое по показаниям БДПН, и приводящих к его отклонению от опорного значения средневзвешенной мощности P_U . Основной же задачей при создании нового АКПМ в составе АКНП являлось создание функции системы, которая может учитывать любую разумную комбинацию факторов, образующих многомерный массив зависимостей.

На основании требований безопасности, анализа показаний и опыта эксплуатации систем вне реакторного контроля мощности в качестве влияющих на показания АКНП факторов при разработке алгоритма АКПМ были установлены следующие:

- изменения показаний БДПН при перераспределении нейтронного поля, вызванного перемещением ОР СУЗ (в том числе непроеKTного – при несанкционированном погружении или извлечении отдельных ОР);
- изменения показаний БДПН при изменении плотности теплоносителя в опускном участке с учетом запаздывания (инерционности) в каналах измерения температур;
- изменение концентраций йода и ксенона в активной зоне;
- изменение температур топлива и теплоносителя;
- выгорание топлива в процессе топливной кампании;
- остаточное энерговыделение в активной зоне (не связанное с контролируемым нейтронным потоком и не регистрируемое БДПН);
- отказы датчиков.

Для описания пространственно-распределенных параметров (концентрация ксенона, эмиттеры запаздывающих нейтронов и т. д.) в алгоритме АКПМ используются специальные базисные функции, которые выбираются так, чтобы наилучшим способом описывать все состояния активной зоны, возникающие при эксплуатации системы АКНП. Они получаются при моделировании большого количества состояний реактора с различными параметрами (положение групп ОР СУЗ, уровень мощности реактора и т.д.). Моделирование состояний реактора проводилось на полномасштабной всережимной трехмерной диффузионной модели ПК «ПРОСТОР» [10]. После этого на основании полученной информации с помощью алгоритма построения базиса главных компонентов (БГК) находятся необходимые базисные функции. В алгоритме использован подход с БГК, позволяющий сильно уменьшить размерность исходной системы, что серьезно увеличивает быстродействие алгоритма при сохранении высокой точности [11].

Тестирование состояний и моделирование реакции АКНП проводилось при помощи многомерного моделирования состояний реактора ВВЭР-1000 на расчетных и экспериментальных данных третьего энергоблока Калининской АЭС. На рисунке 5 в качестве примера приведен единичный результат трехмерного моделирования реакции показаний БДПН АКНП на изменения положения 9-й и 10-й групп ОР СУЗ.

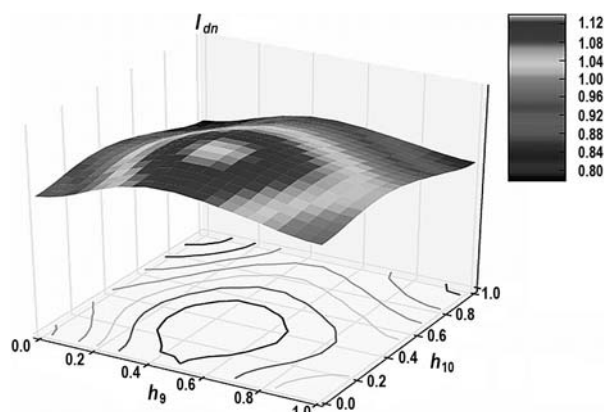


Рис. 5. Модель реакции показаний БДПН АКНП (I_{dn}) на изменения положения 9-й и 10-й групп ОР СУЗ

В составе АКНП-01 на блоке № 1 НВАЭС-2 был применен новейший алгоритм АКПМ, не только обеспечивший заданную точность вычисления значений мощности в стационарных и динамических режимах, но и позволивший практически исключить необходимость периодической ручной тарировки показаний мощности АКНП по значению средневзвешенной мощности энергоблока. В предыдущих поколениях АКНП такая тарировка требовалась в обязательном порядке и проводилась оперативным персоналом в случаях существенного изменения мощности РУ и в процессе выгорания топлива в ходе кампании. В обоих случаях происходило перераспределение плотности потока нейтронов по высоте каналов ИК, которое не могло быть полностью нивелировано алгоритмами коррекции. В частности, при проведении работ на энергоблоке, при которых был пройден цикл «номинальная мощность - разгрузка - отключение от сети - расхолаживание - разогрев - подключение к сети - выход на номинальную мощность» ручная тарировка АКНП не потребовалась, алгоритм АКПМ обеспечил допустимое значение погрешности показаний мощности.

ВЫВОДЫ

Аппаратура АКНП-01, внедренная на энергоблоке № 1 НВАЭС-2 (шестом энергоблоке Нововоронежской АЭС), является одним из элементов новой, спроектированной с учетом всех современных требований [5], управляющей системы безопасности. АКНП-01 обладает рядом технических и алгоритмических усовершенствований по сравнению с аппаратурой предыдущих поколений, отличается высоким уровнем надежности, технологичности, ремонтпригодности. При проектировании особое внимание было уделено учету требований российских и международных стандартов, что позволяет рассматривать аппаратуру в качестве прототипа при создании УСБ энергоблоков АЭС-2006. Ввиду высокой степени унификации аппаратура может быть переконфигурирована для учета требований новой нормативной базы, например, по полному разделению уровней глубокоэшелонированной защиты [13].

Расчетные алгоритмы АКНП обеспечили высокие метрологические показатели и удовлетворение всех требований по погрешности контроля мощности, периода и реактивности в различных режимах работы энергоблока [14]. Новый человеко-машинный интерфейс и глубокая самодиагностика позволяют осуществлять своевременное обнаружение неисправностей, быстрое, удобное и надежное техническое обслуживание оборудования.

Отдельное внимание в процессе проектирования при развитии АКНП уделяется вопросам обеспечения помехозащищенности кабельных трасс и дополнительным мерам по снижению степени влияния помех на работу каналов.

Литература

1. НП-082-07. Правила ядерной безопасности реакторных установок атомных станций. – М.: Ростехнадзор, 2007. – 26 с.
2. Частное техническое задание на создание аппаратуры контроля нейтронного потока АКНП-01 (АКНП). СФЮА.021 ТЗ. – М.: ОАО «ВНИИАЭС», 2011.
3. Дунаев В.Г., Боженков О.Л. Создание АСУ ТП для проектов АЭС-2006. Доклад на Международном форуме «АТОМЭКСПО 2009». Москва, 2009.
4. ГОСТ 27445-87 (СТ СЭВ 6633-89). Системы контроля нейтронного потока для управления и защиты ядерных реакторов. Общие технические требования (с Изменением № 1). – М.: Издательство стандартов, 1988. – 18 с.
5. ГОСТ Р МЭК 61513-2011. Атомные электростанции. Системы контроля и управления, важные для безопасности. Общие требования. – М.: Стандартинформ, 2012. – 78 с.
6. ГОСТ Р МЭК 60880-2006. Атомные электростанции. Системы контроля и управления, важные для безопасности. Программное обеспечение компьютерных систем, выполняющих функции категории А. – М.: Стандартинформ, 2011. – 147 с.
7. ГОСТ Р МЭК 62138-2004. Атомные электростанции. Системы контроля и управления, важные для безопасности. Программное обеспечение компьютерных систем, выполняющих функции категорий В или С. – М.: Стандартинформ, 2011. – 77 с.
8. ГОСТ Р МЭК 60987-2013. Электростанции атомные. Контрольно-измерительные приборы и системы управления, важные для обеспечения безопасности. Требования к проектированию аппаратуры для компьютерных систем. – М.: Стандартинформ, 2013. – 78 с.
9. ГОСТ Р МЭК 62340-2007. Электростанции атомные. Системы приборного оснащения и управления, важные для обеспечения безопасности. Требования по предотвращению отказов по общей причине. – М.: Стандартинформ, 2011. – 50 с.
10. Батулин Д.М., Будникова О.А., Выговский С.Б. и др. Программный комплекс ПРОСТОП (версия 1). Приложение к аттестационному паспорту №182 от 28.10.2004.
11. Семенов А.А., Дружаев А.А., Сергеев И.А., Шукин Н.В., Стриковский В.И. Алгоритм корректировки показания мощности для каналов контроля нейтронного потока. // Ядерная физика и инжиниринг. – 2013. – Т. 4. – № 8. – С. 758-764.
12. СФЮА.501319.007 ТУ. Аппаратура контроля нейтронного потока АКНП-01. Технические условия. – М.: ООО «СКУ-Атом», 2010. – 8 с.
13. Specific Safety Guide No. SSG-39. Design of Instrumentation and Control Systems for Nuclear Power Plants. – IAEA, 2016. Электронный ресурс
<http://regelwerk.grs.de/sites/default/files/cc/dokumente/SSG-39.pdf> (дата доступа 15.05.2017)
14. Сергеев И.А. Опыт реализации АКНП для проектов АЭС-2006 на 6 энергоблоке Нововоронежской АЭС. Доклад на отраслевой научно-технической конференции, 2017.
Электронный ресурс
<http://www.sniip.ru/assets/images/resources/4174/%D0%A1%D0%9A%D0%A3-%D0%90%D1%82%D0%BE%D0%BC%20-%20%D0%9E%D0%BF%D1%8B%D1%82%20%D1%80%D0%B5%D0%B0%D0%BB%D0%B8%D0%B7%D0%B0%D1%86%D0%B8%D0%B8%20%D0%90%D0%9A%D0%9D%D0%9F%20%D0%B4%D0%BB%D1%8F%20%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B5%D0%BA%D1%82%D0%B0%20%D0%90%D0%AD%D0%A1-2006.pdf> (дата доступа 20.06.2017)
15. Изъюргов А.С., Лужнов А.М. Применение внереакторных детекторов для контроля за распределением энерговыделения по высоте активной зоны реакторов PWR. – М.: Информэнерго, 1985. – 28 с.

Поступила в редакцию 26.06.2017 г.

Авторы

Сергеев Иван Алексеевич, генеральный директор ООО «СКУ-Атом»

E-mail: iasergeev@mail.ru

Горбаев Владимир Алексеевич, заместитель руководителя блока атомных станций

КЯТК НИЦ «Курчатовский институт»

E-mail: gorbaev_va@nrcki.ru

Терехов Дмитрий Владимирович, начальник цеха тепловой автоматики и измерений

E-mail: TerehovDV@nvnpp1.rosenergoatom.ru

UDC 621.039-78

NEUTRON FLUX MONITORING EQUIPMENT IN THE DESIGN OF NOVovorONEZH NPP-2

Sergeev I.A.* , Gorbaev V.A.** , Terekhov D.V.***

* JSC «SKU-Atom». 24, Raspletina str., Moscow, 123060

**NRC «Kurchatov Institute».

1 Akademik Kurchatov sq., Moscow, 123182 Russia

*** Branch of JSC «Concern Rosenergoatom» «Novovoronezh Nuclear Power Plant»

1 Promyshlennaya zona Yuzhnaya, Novovoronezh, Voronezh reg.,
396072 Russia

ABSTRACT

A new generation of neutron flux monitoring equipment (NFME) has been developed for the use in the 3+ generation reactor system of the AES-2006 project. This equipment is a part of control and protection system at the power units of Novovoronezh NPP-2. The following technical improvements were implemented: the four-channel two-set system structure, the newest software algorithms. These improvements provide better metrology, hardware security and diagnosability, upgraded man-machine interface. All this provides better safety, as reliability, diagnosability, serviceability, and metrology features are enhanced.

The new NFME development and implementation is based on the following principles: compliance with the requirements and recommendations of modern Russian and international norms and technical regulations, experience of creation and operation of similar systems, comprehensive verification and validation, compliance with requirements for the system integration into the automated process control system project for the new power generation units, high level of quality and reliability, high safety performance principles.

The article describes the basic principles of NFME building, innovative and conventional solutions used for the equipment design; deals with issues of putting NFME into operations (taking into account the specific features of the power unit design, customized equipment placement, special requirements for equipment and communication lines noise immunity, approved conformity of metrological specification, equipment launch settings). The article gives analytical results of the NFME operation during the main stages of physical and power start-up (fuel loading, critical state output and minimum controlled power level, during physical trials and dynamic tests).

During the start-up operations and pilot operation, the NFME was confirmed to comply with the requirements of the project, regulatory documents, accuracy features were quite satisfactory and serviceability was confirmed.

Key words: reactor unit, safety, NFME, neutron flux, reactor power, detection of neutron flux density, measuring channel, power readings correction.

REFERENCES

1. NP-082-07. Federal rules and regulations in the field of nuclear energy use «Nuclear Safety Rules for Nuclear Power Plants». Moscow. Rostekhnadzor Publ., 2007, 26 p. (in Russian).
2. SFUA.021 TZ. Private technical requirements for designing the devices of neutron flux control NFME-01 (AKNP-01). Moscow. JSC «VNIIAES» Publ., 2011 (in Russian).
3. Dunaev V.G., Bozhenkov O.L. *The creation of APCS for NPPs in 2006*. Paper presented at the International forum «ATOMEXPO-2009». Moscow, 2009 (in Russian).
4. GOST 27445-87 (ST SEV 6633-89) Neutron flux monitoring systems for control and protection of nuclear reactors. General technical requirements (with modification №1). Moscow. Izdatel'stvo standartov Publ., 1988, 18 p. (in Russian).

5. IEC 61513:2011. Nuclear power plants. Instrumentation and control important to safety. General requirements for systems. Moscow. Standartinform Publ., 2012, 78 p. (in Russian).
6. IEC 60880:2006 Nuclear power plants. Instrumentation and control systems important to safety. Software aspects for computer-based systems performing category A functions. Moscow. Standartinform Publ., 2011, 147 p. (in Russian).
7. IEC62138:2004. Nuclear power plants. Instrumentation and control important for safety. Software aspects for computer-based systems performing category B or C functions. Moscow. Standartinform Publ., 2011, 77 p. (in Russian).
8. IEC 60987:2013. Nuclear power plants. Instrumentation and control important to safety. Hardware design requirements for computer-based systems. Moscow. Standartinform Publ., 2013, 78 p. (in Russian).
9. IEC 62340:2007. Nuclear power plants. Instrumentation and control systems important to safety. Requirements for coping with common cause failure (CCF). Moscow. Standartinform Publ., 2011, 50 p. (in Russian).
10. Baturin D.M., Budnikova O.A., Vygovskij S.B., Galkin I.V., Zimin V.G., Kraushkin U.A., Korikovskiy K.P., Misherin S.A., Osadchiy M.A., Semenov A.A., Strashnykh V.P., Tikhonov N.V., Chernov E.V., Chernakov V.A., Bay V.F., Bogachek L.N., Lupishko A.A., Chapaev V.M. *The program complex PROSTOR (version 1)*. Application to certification passport №182 ot 28.10.2004 (in Russian).
11. Semenov A.A., Druzhaev A.A., Sergeev I.A., Schukin N.V., Strikovskij V.I. The algorithm adjust the power readings for channels of neutron flux monitoring. *Yadernaya fizika i inzhiniring*. 2013, v. 4, no. 8, pp. 758-764 (in Russian).
12. SFUA.501319.007 TU. *The monitoring of neutron flux NFME-01 (AKNP-01). Specifications*. Moscow. JSC «SKU-Atom» Publ., 2010, 8 p. (in Russian).
13. Specific Safety Guide No. SSG-39. Design of Instrumentation and Control Systems for Nuclear Power Plants, IAEA 2016. Available at <http://regelwerk.grs.de/sites/default/files/cc/dokumente/SSG-39.pdf> (accessed May 15 2017).
14. Sergeev I.A. *Experience in the implementation of NFME for projects NPP-2006 6 power unit of Novovoronezh NPP*. Report on the branch scientific-technical conference, 2017. Available at <http://www.sniip.ru/assets/images/resources/4174/%D0%A1%D0%9A%D0%A3-%D0%90%D1%82%D0%BE%D0%BC%20-%20%D0%9E%D0%BF%D1%8B%D1%82%20%D1%80%D0%B5%D0%B0%D0%BB%D0%B8%D0%B7%D0%B0%D1%86%D0%B8%D0%B8%20%D0%90%D0%9A%D0%9D%D0%9F%20%D0%B4%D0%BB%D1%8F%20%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B5%D0%BA%D1%82%D0%B0%20%D0%90%D0%AD%D0%A1-2006.pdf> (accessed Jun 20 2017) (in Russian).
15. Izlyurov A.S., Luzhnoy A.M. *The use of out-of-pile detectors to control the distribution of energy according to the height of the reactor core PWR*. Moscow. Informenergo Publ., 1985, 28 p. (in Russian).

Authors

Sergeev Ivan Alekseevich, Director of JSC SKU-Atom

E-mail: iasergeev@mail.ru

Gorbaev Vladimir Alexeevich, Deputy Head of NPP Department

E-mail: gorbaev_va@nrcki.ru

Terekhov Dmitry Vladimirovich, Head of I&C Department

E-mail: TerehovDV@nvnpp1.rosenergoatom.ru