

Комплекс АСУЗ-03Р системы управления и защиты исследовательского ядерного реактора ПИК

Алексей Заикин, Михаил Каленский, Владимир Пушкин, Игорь Соколов

В статье представлен принципиально новый подход к задаче построения интегрированного канала формирования сигналов управляющей системы безопасности, используемого в аппаратуре системы управления и защиты для исследовательского ядерного реактора ПИК Петербургского института ядерной физики Российской академии наук.

Введение

Системы обеспечения безопасной работы реакторных установок возникли вследствие необходимости контроля состояния активной зоны реактора, в первую очередь нейтронного потока, затем теплогидравлических параметров. С введением в эксплуатацию электростанций, работающих на ядерном топливе, системам контроля и обеспечения безопасной работы ядерных реакторов стали уделять большее значение.

Значительную часть атомных объектов составляют исследовательские реакторы и критические стенды, предназначенные для научных исследований в области ядерной физики, физики твердого тела, технологии элементов ядерных реакторов, медицины и т.д. Контроль, управление и обеспечение безопасной работы таких ядерно-опасных объектов также немаловажен.

ЗАО «СНИИП-СИСТЕМАТОМ» («ССА», до 1994 г. — отделение НИЦ СНИИП) занимается разработкой аппаратуры обеспечения безопасности ядерных реакторов более тридцати лет. За это время были подтверждены основные концепции построения аппаратуры, изготовлены и установлены системы управления и защиты ядерных реакторов на Кольской, Балаковской, Калининской, Ново-Воронежской, Ровенской, Южно-Украинской, Запорожской АЭС, на АЭС в Ловиизе (Финляндия), Козлодуге (Болгария), Моховце (Словакия) и других. Осна-

щены аналогичными системами контроля и управления защитой исследовательские реакторы центра ядерных исследований (ЦЯИ) в г. Тажура (Ливия) и института ядерных исследований (ИЯИ) в г. Далат (Вьетнам). Аппаратура, установленная на этих ядерно-опасных объектах, обеспечивает по сей день их надежную работу. Например, АЭС в Ловиизе введена в строй в 1975 г., исследовательский реактор при ИЯИ в г. Далат введен в эксплуатацию в 1984 г., и до настоящего времени аппаратура на этих объектах находится в рабочем состоянии.

Основные принципы физики работы ядерных реакторов остаются неизменными. Однако аппаратура, осуществляющая управление ядерными реакторами, как аналоговая, так и цифровая и особенно вычислительная техника, за последние четверть века шагнула далеко вперед. Бурное развитие и повышение надежности микросхем с высокой степенью интеграции и микроконтроллеров открыло перспективы дальнейшего развития и модернизации систем контроля и управления защитой. Аппаратура системы контроля и управления защитой реакторных установок, разрабатываемая в «ССА», прошла все этапы развития электронной техники: первые комплексы были выполнены с применением аналоговой техники (середина 1970-х годов), затем была создана и введена в постоянную эксплуатацию первая в СССР аппаратура контроля нейтронного по-

тока на основе цифровой техники (1987 г., Кольская АЭС). Началось широкое внедрение цифровой техники в систему контроля теплогидравлических параметров, аппаратуру формирования логических сигналов управления реакторной установкой, устройства отображения и регистрации контролируемых параметров.

На рубеже столетий (1999 г.) был разработан и введен в постоянную эксплуатацию комплекс аппаратуры системы контроля и управления защитой на втором блоке Кольской АЭС (фотография Кольской АЭС представлена на первой странице обложки журнала). Аппаратура формирования защитных сигналов по параметрам нейтронного потока и теплогидравлическим параметрам этого комплекса традиционно была выполнена на основе хорошо зарекомендовавшей себя цифровой аппаратуры разработок середины 1980-х годов. Наряду с этим аппаратура формирования управляющих сигналов аварийной защиты была выполнена на логических матрицах фирмы Altera. Практически вся аппаратура систем контроля, не входящая в состав системы управления аварийной защитой реактора (это аппаратура контроля перегрузки, автоматический регулятор мощности, аппаратура контроля реактивности, аппаратура сигнализации первопричины аварийной ситуации, устройства отображения и протоколирования информации), была выполнена с применением процессорной тех-

ники на основе изделий фирм Octagon Systems, Advantech, Analog Devices, Grayhill, Planar, Bopla, Artesyn Technologies.

С 1997 г. в «ССА» получило развитие новое направление в области разработки систем контроля и управления защитой ядерных реакторов — применение специализированных микроконтроллеров в аппаратуре управляющей системы безопасности и управления технологической автоматикой. Применение микроконтроллеров подняло аппаратуру на более высокий технический уровень, повысило ее надежность и помехоустойчивость, привело к сокращению объема аппаратуры, сделало ее гибкой и легко адаптируемой к конкретному проекту, более эргономичной по отношению к обслуживающему персоналу.

СТРУКТУРА КОМПЛЕКСА

Комплекс аппаратуры АСУЗ-03Р является составной электронной частью системы управления и защиты (СУЗ) исследовательского ядерного реактора ПИК. Он осуществляет контроль и обеспечивает безопасность эксплуатации реакторной установки во всех режимах: во время пуска реактора, работы на заданном уровне мощности, перегрузки (загрузки) топлива, а также при возникновении аварийной ситуации и при остановленном реакторе. В соответствии с НП-033-01 «Общие положения обеспечения безопасности исследовательских ядерных установок» (ОПБ ИЯУ) элементы комплекса подразделяются на следующие классы безопасности: 2УН, 3Н, 3У, 4.

Данный комплекс представляет собой логически завершенную структуру с наличием постоянного программного и аппаратного контроля подсистем управления аварийной защитой, оперативного контроля текущего состояния, долговременной архивации и документирования информации, автоматической предпусковой проверки.

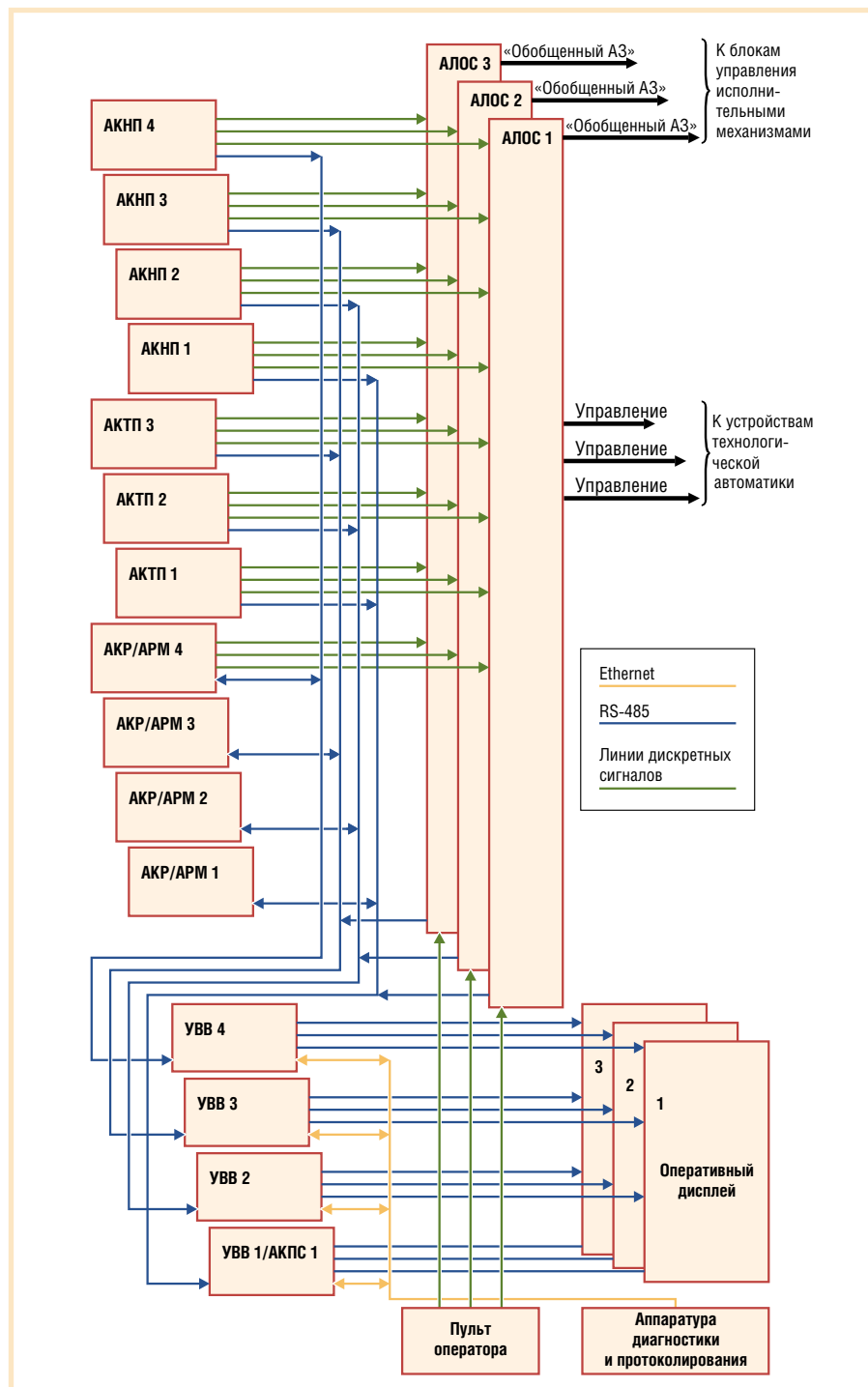
Комплекс выполнен на основе модулей с применением стандартных логических элементов, логических матриц с высокой степенью интеграции, специализированных микроконтроллеров, разработанных в «ССА», промышленных компьютеров и модулей ввода-вывода фирмы Octagon Systems, преобразователей сигналов фирм Analog Devices и Grayhill, электролюминесцентных дисплеев фирмы Planar, преобразователей напряжения фирмы Artesyn

Technologies, промышленной рабочей станции фирмы Advantech.

В состав комплекса АСУЗ-03Р (рис. 1) входят четыре канала контроля и формирования защитных сигналов по параметрам нейтронного потока, три канала контроля и формирования защитных сигналов по теплогидравлическим параметрам, три канала фор-

мирования управляющих сигналов для защитной системы безопасности и технологической автоматикой, четыре канала контроля реактивности, четыре регулятора мощности, один канал контроля положения рабочих органов.

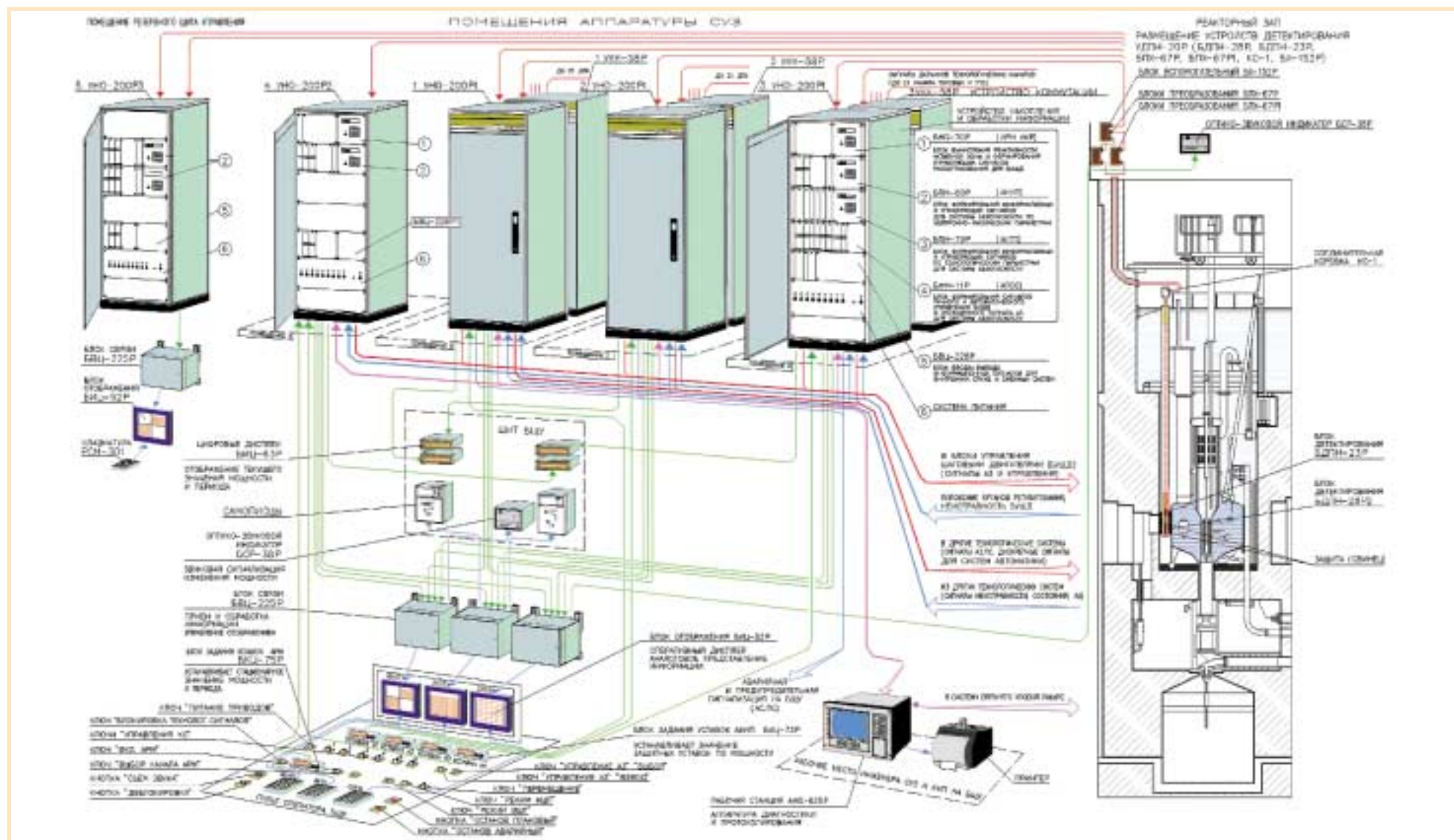
Контроль реактивности и регулирования мощности реакторной установки осуществляется по информации,



Условные обозначения:

АКНП — аппаратура контроля нейтронного потока; АКТП — аппаратура контроля теплогидравлических параметров; АЛОС — аппаратура логической обработки сигналов; АКР — аппаратура контроля реактивности; АРМ — автоматический регулятор мощности; АКПС — аппаратура контроля положения стержней; УВВ — управление вводом-выводом информации; «Обобщенный АЗ» — обобщенный управляющий сигнал аварийной защиты; «Управление» — сигналы управления устройствами технологической автоматикой.

Рис. 1. Структурная схема комплекса АСУЗ-03Р



Условные обозначения: АРМ — автоматический регулятор мощности; БЩУ — блочный щит управления; РЩУ — резервный щит управления; АЗ — аварийная защита; УНО — устройство накопления и обработки информации; ПС — предупредительная сигнализация; ДТК — детекторы технологических каналов; БУШД — блок управления шаговым двигателем (другое название — блок управления исполнительными механизмами — БИУМ); АКР — аппаратура контроля реактивности; АКНП — аппаратура контроля нейтронного потока; АЛОС — аппаратура логической обработки сигналов; АКТП — аппаратура контроля теплогидравлических параметров; ТПС — термопреобразователь сопротивления; АС — аварийная сигнализация; КИП — контрольно-измерительная аппаратура; К1-К4 — 1-4 каналы АКНП; «УПРАВЛЕНИЕ КС» — управление перемещением компенсирующих рабочих органов исследовательского реактора; «УПРАВЛЕНИЕ АЗ» — управление перемещением рабочего органа аварийной защиты исследовательского реактора; «РЕЖИМ НШТ» — выбор режима работы нижней шторки (рабочего органа автоматического регулирования); «РЕЖИМ ВШТ» — выбор режима работы верхней шторки (рабочего органа автоматического регулирования).

Рис. 2. Функциональная схема комплекса АСУЗ-03Р

поступающей от блоков детектирования нейтронного потока, участвующих в формировании сигналов защиты по параметрам нейтронного потока.

Комплекс АСУЗ-03Р также обеспечивает контроль нейтронного потока по двум независимым каналам при помощи аппаратуры, расположенной на резервном щите управления (РЩУ).

Контроль оперативной информации и состояния исправности реакторной установки реализуется посредством нескольких устройств, работающих одновременно:

- три аналоговых дисплея пульта оператора блочного щита управления (БЩУ) и один аналоговый дисплей РЩУ, предназначенные для отображения в виде гистограмм и в цифровом виде значений теплогидравлических параметров, параметров нейтронного потока, реактивности, величины разбаланса, положения рабочих органов, состояния исправности блоков и устройств комплекса;
- четыре строчных цифровых дисплея, предназначенные для отображения поканального значения мощности нейтронного потока и величины обратной скорости изменения плотности нейтронного потока (период разгона реактора);
- самопишущие регистраторы для непрерывной записи поканальной и усредненной величины мощности нейтронного потока, поканального и минимального значения периода разгона реактора;
- рабочая станция и принтер, предназначенные для отображения, архивирования, протоколирования параметров комплекса во всех режимах работы реактора, а также диагностики блоков, участвующих в формировании защитных сигналов, и проверки систем технологической автоматики в режиме останова реактора.

Комплекс АСУЗ-03Р передает информацию в систему верхнего уровня РАКУРС — распределенный автоматизированный комплекс управления реакторной установкой — и получает от этой системы сигналы единого времени.

Аппаратура комплекса АСУЗ-03Р размещена в различных помещениях здания исследовательского реактора:

- блоки детектирования, усилители, преобразователи, блок сигнализации разгона — в реакторном зале;
- устройства накопления и обработки информации, устройства коммута-

ции — в отдельных помещениях аппаратуры СУЗ;

- устройства отображения информации, самопишущие регистраторы, блок сигнализации разгона, органы управления реакторной установкой, аппаратура диагностики и протоколирования (АДП) — в помещении БЩУ;
- устройство накопления и обработки информации, устройства отображения и регистрации информации — в помещении РЩУ.

Функциональная схема, представленная на рис. 2, показывает основные устройства и блоки комплекса, схематично указывает места их расположения на объекте и направления обмена информацией между составными частями комплекса АСУЗ-03Р и другими защитными и обеспечивающими безопасностью системами СУЗ.

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ КОМПЛЕКСА

При разработке комплекса АСУЗ-03Р были реализованы следующие принципы структурного построения, концепции организации обмена информацией и требования к программному обеспечению.

- Комплекс имеет традиционную канальную («ниточную») структуру и включает в себя аппаратуру, начиная от устройств детектирования и заканчивая устройством формирования обобщенного управляющего сигнала аварийной защиты («Обобщенный АЗ») и управляющих сигналов для технологической автоматики. Структура комплекса АСУЗ-03Р обеспечивает полную конструктивную, электрическую и функциональную независимость каналов.
- В комплексе используется принцип проектирования устройств и блоков двойного функционального назначения. Аппаратура формирования сигнала «Обобщенный АЗ», выполняющая функции защиты, контроля и управления, выполнена в виде единого устройства накопления и обработки информации (УНО) с блочной архитектурой, каждый блок — составная часть канала контроля и защиты.
- Аппаратура, формирующая сигналы для защитной системы безопасности, выполнена с применением специализированных микроконтроллеров и классифицируется как аппаратура класса 2УН.

- Аппаратура, выполняющая функции контроля, построена с использованием микропроцессоров промышленного назначения фирмы Octagon Systems и является аппаратурой класса 3Н и 3У.

- Единая для всего комплекса АСУЗ-03Р аппаратура, обеспечивающая диагностику, архивацию, протоколирование, предпусковую проверку, передачу информации на верхний уровень, — аппаратура диагностики и протоколирования (АДП) — реализована на базе промышленного компьютера фирмы Advantech. Это аппаратура 4-го класса.

- Программное обеспечение для аппаратуры класса 2 разработано на ассемблере, является новым, не содержащим встроенной операционной системы MS-DOS и BIOS. Остальное программное обеспечение разработано на языке Паскаль и функционирует под управлением MS-DOS совместимой операционной системы.

- Входной информацией для комплекса являются значения плотности потока тепловых нейтронов, унифицированные токовые сигналы 4...20 мА, сигналы с выходов термопреобразователей сопротивления (ТПС), поступающие от измерительных устройств и датчиков теплогидравлических параметров, а также сигналы с выходов переменных сопротивлений ПТП-22, контролирующих положение рабочих органов, и дискретные сигналы состояния обеспечивающих систем.

- Обмен информацией между блоками и устройствами комплекса осуществляется как по стандартным интерфейсам RS-485 и Ethernet, так и в виде обмена частотными и дискретными сигналами.

- Все входные и выходные линии связи между устройствами комплекса, а также между комплексом и другими системами гальванически развязаны и выдерживают испытательное напряжение 1500 В.

- Электропитание комплекса осуществляется от четырёх вводов надежного источника напряжения (220 В/50 Гц) первой категории.

- Электропитание АДП и самопишущих регистраторов производится от сети переменного напряжения (220 В/50 Гц) БЩУ.

- Электропитание остальных блоков и устройств комплекса осуществляется

Таблица 1. Технические характеристики УНО

Диапазон рабочих температур	+1...+50°C
Диапазон температур хранения	–40...+50°C
Допустимая относительная влажность	80% при 35°C
Степень защиты	IP30
Сейсмостойкость	8 баллов на высоте 24 м по шкале MSK-64
ЭМС	IV группа исполнения по устойчивости к помехам, критерий качества функционирования при воздействии помех — А; соответствует требованиям ГОСТ Р 50746-2000, ГОСТ 29191 (IEC 61000-4-2), ГОСТ Р 50008 (IEC 61000-4-3), ГОСТ Р 29156 (IEC 61000-4-4), ГОСТ Р 50007 (IEC 61000-4-5), ГОСТ Р 50627 (IEC 61000-4-11), ГОСТ Р 50648 (IEC 61000-4-8)
Напряжение электропитания	220 В/50 Гц
Потребляемая мощность	120 В·А
Тип соединителей	Клеммные колодки фирмы Wago
Габаритные размеры	1800×600×600 мм
Масса	250 кг
Среднее время наработки на отказ (MTBF)	200 000 ч

от шины постоянного напряжения 24 В, которое вырабатывается устройствами УНО.

- Аппаратура комплекса изготовлена с применением как конструктивов, разработанных в «ССА», так и стандартных конструктивов и элементов конструкций фирмы Schroff.

Всё это позволило унифицировать модули (узлы), стандартизировать блоки, объединить в одну стойку несколько функционально завершённых блоков. Таким образом был создан интегрированный канал УНО, формирующий управляющий сигнал для защитной системы безопасности и системы нормальной эксплуатации, выполняющий следующие функции:

- контроль уровня и скорости нарастания плотности нейтронного потока, формирование соответствующих защитных сигналов;
- контроль теплогидравлических параметров и формирование соответствующих защитных сигналов;
- логическая обработка сигналов и формирование управляющих сигналов аварийной защиты;
- логическая обработка и формирование управляющих сигналов для устройств технологической автоматики;
- групповое и индивидуальное управление рабочими органами;
- контроль положения рабочих органов (стержней);
- контроль реактивности;
- регулирование мощности;
- управление потоком информации.

В состав интегрированного канала входит электронная часть, обрабатывающая и формирующая сигналы «нитечных» каналов контроля. Функцио-

нальная интеграция происходит на уровне формирования управляющего

сигнала аварийной защиты и сигналов для устройств технологической автоматики. Конструктивная интеграция заключается в совмещении логической части «нитечных» каналов контроля в одном устройстве — УНО.

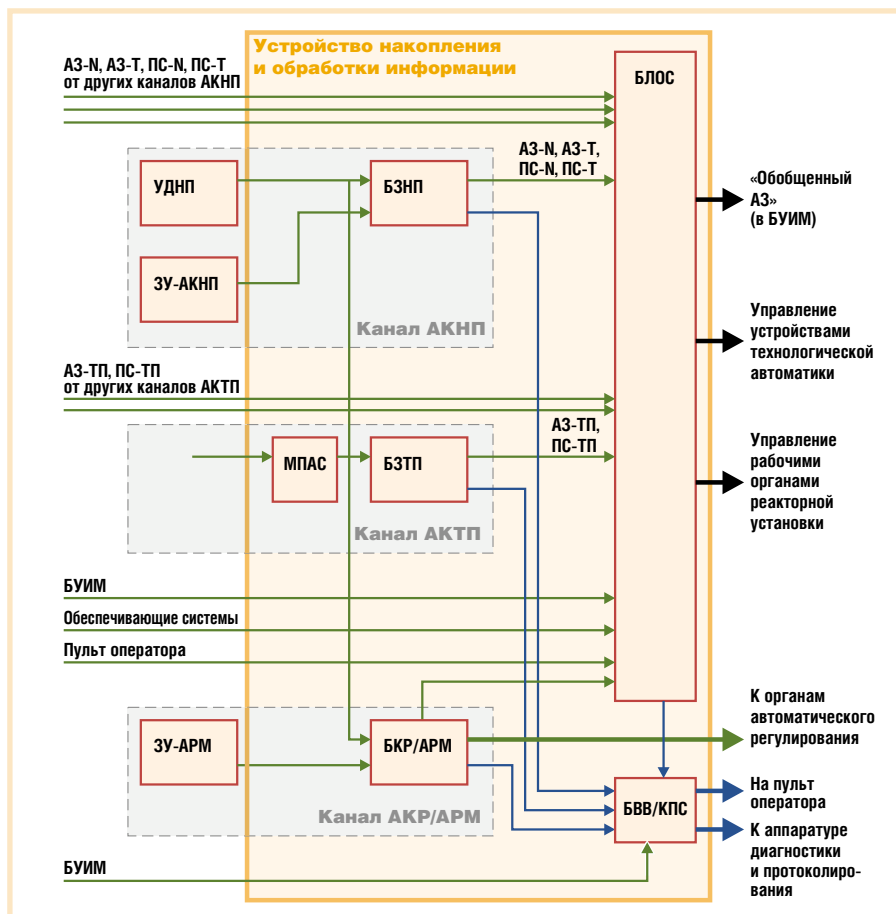
В табл. 1 приводятся некоторые технические характеристики УНО.

Функциональная схема интегрированного канала управляющей системы безопасности представлена на рис. 3. Конструктивное исполнение стойки УНО показано на рис. 4.

ОПИСАНИЕ СОСТАВНЫХ ЧАСТЕЙ КОМПЛЕКСА

Каналы контроля и аварийной защиты по параметрам нейтронного потока

Каналы данного типа включают аппаратуру контроля нейтронного потока (АКНП), состоящую из устройства



Условные обозначения:

УДНП — устройство детектирования нейтронного потока; БЗНП — блок защиты по параметрам нейтронного потока; ЗУ-АКНП — блок задания уставок по мощности АКНП; БЗТП — блок защиты по теплогидравлическим параметрам; БЛОС — блок логической обработки и формирования сигналов для блоков управления исполнительными механизмами (БУИМ), устройств технологической автоматики и группового и индивидуального управления рабочими органами (РО); БКР/АРМ — блок контроля реактивности и автоматического регулирования мощности; ЗУ-АРМ — блок задания уставок АРМ; БВВ/КПС — блок контроля положения стержней и ввода-вывода информации; АЗ и ПС — сигналы аварийной защиты и предупредительной сигнализации по мощности (Н), периоду разгона (Т), теплогидравлическим параметрам (ТП); МПАС — модуль преобразования аналоговых сигналов.

Рис. 3. Структурная схема интегрированного канала формирования сигналов управляющей системы безопасности исследовательского реактора



Рис. 4. Конструктивное исполнение стойки УНО (интегрированного канала формирования сигналов управляющей системы безопасности исследовательского реактора)



Блок детектирования БДПН-28Р

Блоки детектирования АKNП размещены в каналах ионизационных камер (каналы ИК). Это сухие вертикальные окруженные свинцовым экраном каналы. При номинальном уровне мощности с учетом свинцовых экранов в местах расположения блоков детектирования плотность потока тепловых нейтронов не превышает $1,2 \times 10^{-10}$ нейтр./ $(\text{см}^2 \cdot \text{с})$ (примем сокращённое обозначение «нейтр.» — нейтрон), мощность дозы гамма-излучения — не более 1×10^{-6} Р/ч.

Для измерения плотности потока тепловых нейтронов используется устройство детектирования УДПН-20Р, состоящее из блоков детектирования БДПН-28Р и БДПН-23Р, коробки соединительной КС-1, двух блоков преобразования БПХ-67Р и БПХ-67Р1, блока вспомогательного БХ-152Р. Устройство УДПН-20Р преобразует плотность потока нейтронов в частоту следования импульсов; частота следования импульсов пропорциональна тепловой мощности реактора.

Блоки детектирования БДПН-28Р и БДПН-23Р, установленные в каждом канале ИК, размещены на разной вы-

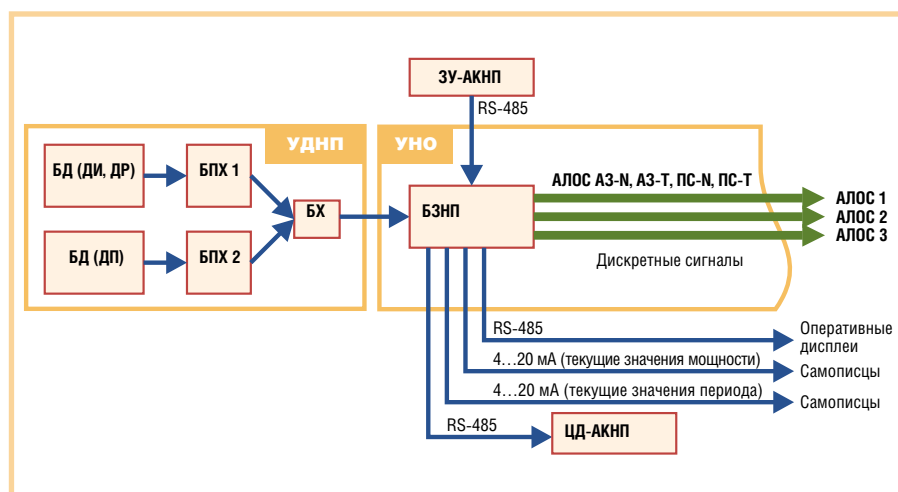


Блок контроля и защиты по параметрам нейтронного потока БПМ-80Р

детектирования нейтронного потока (УДНП), блока защиты по параметрам нейтронного потока (БЗНП), блока задания уставок по мощности АKNП (ЗУ-АKNП), цифрового дисплея (ЦД-АKNП), а также оперативные дисплеи пульта оператора и самопишущие регистраторы. Структурная схема канала АKNП представлена на рис. 5.

Уровень мощности реактора контролируется шестью независимыми каналами измерения плотности потока тепловых нейтронов. Четыре из них предназначены для контроля параметров и формирования сигналов аварийной защиты по мощности и периоду разгона

реактора, два — только для контроля параметров с РЩУ. Необходимая информация по шести каналам отображается на дисплеях пульта оператора БЩУ и РЩУ.



Условные обозначения:

УДНП — устройство детектирования нейтронного потока; БД (ДИ, ДР) — блок детектирования диапазонов источника и рабочего; БД (ДП) — блок детектирования диапазона промежуточного; БПХ 1 и БПХ 2 — блоки преобразования и усиления сигналов; БХ — блок вспомогательный; БЗНП — блок защиты по параметрам нейтронного потока; ЗУ-АKNП — блок задания уставок по мощности АKNП; ЦД-АKNП — цифровой дисплей, отображающий мощность и период канала АKNП; АЗ-Н, АЗ-Т, ПС-Н, ПС-Т — сигналы аварийной защиты и предупредительной сигнализации по мощности (Н) и по периоду разгона реактора (Т).

Рис. 5. Структурная схема канала АKNП

соте относительно центра активной зоны реактора. Блок БДПН-28Р находится по центру активной зоны, блок БДПН-23Р смещен по высоте относительно центра активной зоны. Блок БДПН-28Р изготовлен на основе импульсной ионизационной урановой камеры деления типа КНК-15, работает в двух режимах (импульсном и токовом) и обеспечивает контроль плотности нейтронного потока в диапазоне источника (ДИ) от 1×10^0 до $1 \times 10^{+6}$ нейтр./ $(\text{см}^2 \cdot \text{с})$ ($1 \times 10^{-8} \dots 1 \times 10^{-2} \% N_{\text{ном}}$, $N_{\text{ном}}$ — номинальное значение мощности реакторной установки) и в рабочем диапазоне (ДР) от $1 \times 10^{+7}$ до $1,2 \times 10^{+10}$ нейтр./ $(\text{см}^2 \cdot \text{с})$ ($1 \times 10^{-1} \dots 1,2 \times 10^{+2} \% N_{\text{ном}}$). Блок детектирования БДПН-23Р на основе ионизационной урановой камеры деления предназначен для обеспечения перекрытия диапазонов ДИ и ДР (промежуточный диапазон — ДП) и измерения плотности нейтронного потока в пределах от $1 \times 10^{+5}$ до $1 \times 10^{+8}$ нейтр./ $(\text{см}^2 \cdot \text{с})$ ($1 \times 10^{-3} \dots 1 \times 10^0 \% N_{\text{ном}}$).

Таким образом обеспечивается контроль мощности реактора в диапазоне от 1×10^{-8} до $1,2 \times 10^{+2} \% N_{\text{ном}}$ ($1 \times 10^0 \dots 1,2 \times 10^{+10}$ нейтр./ $(\text{см}^2 \cdot \text{с})$), при этом перекрытие поддиапазонов составляет более одного десятичного порядка и может корректироваться перемещением блока детектирования промежуточного диапазона (БДПН-23Р) относительно центра активной зоны в период настройки канала АКНП. В процессе эксплуатации блоки детектирования не перемещаются.

Частотные сигналы от устройства УДПН-20Р поступают в блок защиты по параметрам нейтронного потока БПМ-80Р устройства УНО для вычисления текущего значения мощности и периода разгона реактора и формирования поканальных сигналов аварийной защиты и предупредительной сигнализации по мощности (АЗ-Н, ПС-Н) и по периоду (АЗ-Т, ПС-Т). В блоке БПМ-80Р функции приема частотных сигналов от устройства детектирования, вычисления текущих значений мощности и периода, приема текущего значения уставки АКНП, формирования аварийных и предупредительных сигналов, управления встроенными дисплеем и клавиатурой, а также передачи информации по интерфейсам RS-485 возложены на один модуль, выполненный на базе микроконтроллера.

Формирование сигналов АЗ-Н и ПС-Н осуществляется при превыше-

нии текущего значения мощности над установленным в ЗУ-АКНП (БКЦ-73Р) значением уставки для АЗ-Н. При этом величина уставки для ПС-Н определяется соотношением (уставка для АЗ-Н)/(уставка для ПС-Н)=120/110 в диапазоне контроля мощности от 1×10^{-7} до $1,2 \times 10^{+2} \% N_{\text{ном}}$. Дискретность задания уставки для АЗ-Н в диапазоне от 1×10^{-7} до $1 \% N_{\text{ном}}$ — 10%, в диапазоне от 1 до $1,2 \times 10^{+2} \% N_{\text{ном}}$ — 1%. Количество блоков задания уставок по мощности равно числу каналов АКНП. Блоки БКЦ-73Р расположены на пульте оператора, передача значения уставки АЗ-Н осуществляется по последовательному интерфейсу RS-485.

Формирование сигналов АЗ-Т, ПС-Т осуществляется, если текущее значение периода разгона реактора превысит значение уставки для АЗ-Т. Величина уставки для ПС-Т определяется как $2 \times (\text{уставка для АЗ-Т})$. Величина уставки для АЗ-Т задается непосредственно с помощью встроенной клавиатуры блока БПМ-80Р и может принимать целочисленные значения от 0 до 999 с.

Блок БПМ-80Р формирует и передает по последовательному интерфейсу RS-485 информацию в БЩУ для последующего отображения значений мощности и периода на цифровом дисплее ЦД-АКНП (БИЦ-63Р). Значения контролируемых параметров отображаются также на дисплеях пульта оператора (блоки БИЦ-52Р) и регистрируются самописцами типа РП-160.

Каналы контроля и аварийной защиты по теплогидравлическим параметрам

Каналы этого типа включают аппаратуру контроля теплогидравлических параметров (АКТП), состоящую из устройств, измеряющих давление, температуру, уровень и расход воды реактора, и блока защиты по теплогидравлическим параметрам (БЗНП), а также оперативные дисплеи пульта оператора. Структурная схема канала АКТП изображена на рис. 6.

В устройствах УНО блок защиты по теплогидравлическим параметрам БПМ-79Р осуществляет вычисление значений контролируемых величин и

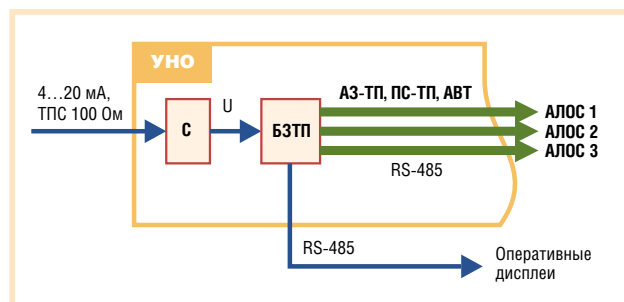


Блок ЗУ-АКНП (БКЦ-73Р)

формирование сигналов аварийной защиты (АЗ-ТП), предупредительной сигнализации (ПС-ТП) и сигналов управления устройствами технологической автоматики (АВТ) по результатам сравнения текущего значения каждого параметра с соответствующими уставками. В блоке БПМ-79Р эту функцию осуществляет один модуль, выполненный с применением микроконтроллера, обеспечивающего, кроме того, управление 24 аналого-цифровыми преобразователями, встроенными дисплеем и клавиатурой, а также передачу данных по интерфейсам RS-485.

Первичными преобразователями, контролирующими давление, расход и уровень воды, являются преобразователи типа «Сапфир-22М» класса точности 0,5. Диапазон изменения выходного сигнала таких преобразователей от 4 до 20 мА. Датчиками температуры являются платиновые термопреобразователи сопротивления (100 Ом, класс допуска А). Прием сигналов от «Сапфир-22М» и термопреобразователей сопротивления, а также обеспечение гальванической развязки входного сигнала осуществляется при помощи модулей фирмы Analog Devices. Перечень контролируемых теплогидравлических параметров, диапазон их измерения и значения уставок для АЗ-ТП, ПС-ТП, АВТ по этим параметрам приведены в табл. 2.

Значения уставок хранятся в энергонезависимой памяти микроконтроллера.



Условные обозначения:

БЗНП — блок защиты по теплогидравлическим параметрам;
С — модуль преобразования и гальванической развязки фирмы Analog Devices; АЗ-ТП и ПС-ТП — сигналы аварийной защиты и предупредительной сигнализации по теплогидравлическим параметрам; АВТ — сигналы управления устройствами технологической автоматики; ТПС — термопреобразователи сопротивления.

Рис. 6. Структурная схема канала АКТП

ра и могут быть изменены с помощью встроенных дисплея и клавиатуры блока БПМ-79Р.

Блок БПМ-79Р также формирует и передает по RS-485 информацию для последующего отображения контролируемых параметров на оперативных дисплеях пульта оператора.

Каналы логической обработки сигналов и формирования управляющих сигналов для аварийной защиты и технологической автоматики

Каналы данного типа образованы аппаратурой логической обработки сигналов (АЛОС), главным элементом которой является блок обработки сигналов (БЛОС — БФМ-11Р), и оперативными дисплеями пульта оператора. Структурная схема канала АЛОС представлена на рис. 7.

Каналы АЛОС обеспечивают управление защитой в аварийном режиме при отклонении параметров реактора от установленных значений и отказе оборудования обеспечивающих систем, а также в нормальном режиме эксплуатации по сигналам с пульта оператора.

Алгоритмы управления реакторной установкой разработаны НИКИЭТ. В соответствии с этими алгоритмами АЛОС осуществляет формирование обобщенного управляющего сигнала аварийной защиты от четырех каналов АКНП по логике 2 из 4, от трех каналов АКТП по логике 2 из 3 и от сигналов оборудования обеспечивающих систем: при аварии дизель-генератора, при неисправности агрегатов бесперебойного питания, при неисправности щита постоянного тока, при наличии сигнала аварийной защиты от источников холодных нейтронов, при закрытии отсечных задвижек системы аварийного охлаждения реактора центрального экспериментального канала, при сигнале аварии от системы промышленной антисейсмической защиты, при неисправности системы жидкостного регулятора.

Сигналы о состоянии органов управления реакторной установкой, расположенных на пульте оператора, поступают в каждый канал АЛОС по независимым линиям связи с гальванической развязкой, и только после логической обработки этих сигналов осуществляется ручное и (или) автоматическое управление реакторной установкой.

Сигнал «Обобщенный АЗ» и сигналы управления рабочими органами реакторной установки поступают от каждого

Таблица 2. Контролируемые теплогидравлические параметры, диапазоны их измерения и значения уставок для формирования сигналов аварийной защиты, предупредительной сигнализации и сигналов управления устройствами технологической автоматики

Обозначение параметра	Наименование параметра	Диапазон измерения	Номинальное значение	Значение уставок
P_p	Давление в корпусе реактора, МПа	0...10	5,00	↓АЗ-ТП, АВТ: <4,50 ↓ПС-ТП, АВТ: <4,75 ↑ПС-ТП, АВТ: >5,15 ↑АЗ-ТП, АВТ: >5,25 АВТ: >4,50
T_p	Температура воды на выходе из реактора, °С	0...150	86	↑ПС-ТП, АВТ: >90 ↑АЗ-ТП, АВТ: >95
$H_{ко}$	Уровень воды в компенсаторе объема 1-го контура, мм	1640...2270	2000	↓АЗ-ТП, АВТ: <1700 ↓ПС-ТП, АВТ: <1800 АВТ: <2000 АВТ: >2000 ↑ПС-ТП, АВТ: >2200
G_p	Расход воды на входе в реактор как сумма расходов воды в каждом из 3 напорных коллекторов 1-го контура, м³/ч	0...2500	2400	↓АЗ-ТП, АВТ: <2040 ↓ПС-ТП, АВТ: <2160
ΔP	Перепад давления между 1-м контуром и жидкостным регулятором как разность давлений в 1-м контуре и в контуре жидкостного регулятора, МПа	0...6,3	3,70	↓АЗ-ТП, АВТ: <3,40 ↓ПС-ТП, АВТ: <3,55
P_c	Давление воды на входе в центральный экспериментальный канал, МПа	0...10	5,00	↓АЗ-ТП, АВТ: <4,50 ↓ПС-ТП, АВТ: <4,75 ↑ПС-ТП, АВТ: >5,15 ↑АЗ-ТП, АВТ: >5,25
T_c	Температура воды на входе в центральный экспериментальный канал, °С	0...150	100	↑ПС-ТП, АВТ: >105 ↑АЗ-ТП, АВТ: >110
H_c	Уровень воды в компенсаторе объема центрального экспериментального канала, мм	0...1000	860	↓АЗ-ТП, АВТ: <730 ↓ПС-ТП, АВТ: <774 АВТ: <860 АВТ: >860 ↑ПС-ТП, АВТ: >946
G_c	Расход воды в центральном экспериментальном канале, м³/ч	0...10	8,00	↓АЗ-ТП, АВТ: <6,40 ↓ПС-ТП, АВТ: <7,20
$G_{пкц}$	Расход воды через предохранительный клапан и теплообменник центрального экспериментального канала, м³/ч	0...50	44	↓АЗ-ТП, АВТ: <20
$P_{ж}$	Давление раствора-поглотителя на входе в реактор, МПа	0...2,50	1,30	↓АЗ-ТП, АВТ: <1,04 ↓ПС-ТП, АВТ: <1,17 ↑ПС-ТП, АВТ: >1,43 ↑АЗ-ТП, АВТ: >1,56
$T_{ж}$	Температура на выходе контура жидкостного регулятора, °С	0...100	60	↑ПС-ТП, АВТ: >80 ↑АЗ-ТП, АВТ: >90
$H_{ж}$	Уровень раствора-поглотителя в компенсаторе объема жидкостного регулятора, мм	400...1030	700	↓АЗ-ТП, АВТ: <500 ↓ПС-ТП, АВТ: <600 ↑ПС-ТП, АВТ: >800
$G_{ж}$	Расход раствора-поглотителя жидкостного регулятора, м³/ч	0...63	55	↓АЗ-ТП, АВТ: <44 ↓ПС-ТП, АВТ: <50
$G_{пк1к}$	Расход воды через предохранительный клапан и теплообменник № 1, 3 или 5 1-го контура, м³/ч	0...2000	1800	↓АЗ-ТП, АВТ: <800 ↓ПС-ТП, АВТ: <1200

Условные обозначения:

↑ — уставка по превышению текущего значения параметра;

↓ — уставка по понижению текущего значения параметра.

устройства УНО в блоки управления исполнительными механизмами (БУИМ, эти блоки для реактора ПИК называются БУШД — блоки управления шаговыми двигателями) по независимым линиям связи, где также происходит мажорирование этих сигналов по логике 2 из 3.

Каждый канал АЛОС обеспечивает мажорирование по логике 2 из 3 значений превышения уставок для АВТ по теплогидравлическим параметрам, которые поступают из каналов АКТП, формирование и последующую пере-

дачу дискретных сигналов для устройств технологической автоматики. Исправность выходных линий этих сигналов контролируется на дисплеях пульта оператора.

Минимальное время формирования сигнала «Обобщенный АЗ» по каналам АКНП — 20 мс, по каналам АКТП — 50 мс.

Каждый канал АЛОС выполняет функцию индивидуального определения времени падения рабочих органов с момента формирования сигнала «Обо-

щенный АЗ» до момента срабатывания нижнего концевого выключателя.

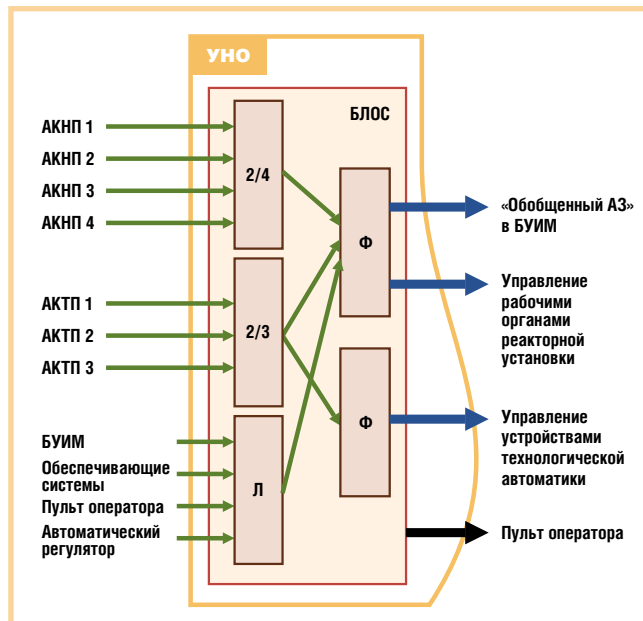
Блок обработки сигналов БФМ-11Р выполнен с применением модуля микроконтроллера, осуществляющего функции контроля и передачи информации, и модулей на логических матрицах, выполняющих функцию формирования обобщенных управляющих сигналов для аварийной защиты и устройств технологической автоматики. Обмен информацией между модулями производится по общей шине.

Каналы контроля реактивности и регулирования мощности реактора

Функции контроля реактивности (АКР) и автоматического регулятора мощности (АРМ) реактора выполняет блок БНО-70Р, расположенный в устройствах УНО-200Р1 и УНО-200Р2. Причем блок БПМ-70Р в устройствах УНО-200Р1 выполняет одну функцию — контроль реактивности, а функция регулирования мощности находится в «горячем» резерве; блок БНО-70Р, расположенный в устройстве УНО-200Р2, реализует две функции — контроль реактивности и регулирования мощности. Блок БНО-70Р выполнен с применением микропроцессора и модулей фирмы Octagon Systems, а также модулей на дискретных элементах, разработанных в «ССА».

Для контроля реактивности и автоматического регулирования мощности реактора используется информация от тех же устройств детектирования, которые предназначены для формирования сигналов аварийной защиты и контроля АКНП. Эта информация ретранслируется блоком БПМ-80Р в виде частотного сигнала. Для вычисления реактивности используется точечная модель ядерного реактора с учетом шести групп запаздывающих нейтронов. Вычисленное значение реактивности передается на оперативные дисплеи пульта оператора.

Регулятор мощности обеспечивает формирование сигналов управления органами автоматического регулирования реакторной установки с целью подъема мощности до заданного уровня и автоматического поддержания



Условные обозначения:

БЛОС — блок логической обработки сигналов; 2/4 — обработка сигналов от АКНП по мажоритарной логике 2 из 4; 2/3 — обработка сигналов от АКТП по мажоритарной логике 2 из 3; Л — логическая обработка сигналов; Ф — формователи сигналов для БУИМ и устройств технологической автоматики.

Рис. 7. Структурная схема канала АЛОС

мощности на заданном уровне в диапазоне контроля от 1×10^{-5} до $1 \times 10^{+2} \% N_{\text{ном}}$. Автоматическое регулирование мощности осуществляется как по выбранному (одному из четырех), так и по среднему для четырех каналов АКНП значению мощности. АРМ обеспечивает автоматическое увеличение мощности с заданным периодом 35 или 70 с, начиная с мощности не менее $1 \times 10^{-5} \% N_{\text{ном}}$ до заданного уровня и стабилизацию уровня мощности в диапазоне $1 \times 10^{-2} \dots 1 \times 10^2 \% N_{\text{ном}}$.

Органов автоматического регулирования два: нижняя и верхняя шторы, перекрывающие центр активной зоны.

АРМ обеспечивает формирование сигнала, пропорционального относительному отклонению мощности реактора от заданного значения, сравнение этого сигнала с обратным периодом реактора и преобразование полученного значения в дискретные сигналы положительного и отрицательного разбаланса. Сигналы положительного и отрицательного разбаланса передаются в БУИМ. Информация о величине разбаланса и положении органов автоматического регулирования представлена на оперативном дисплее пульта оператора.

Выбор канала, по которому производится регулирование мощности, и переход на регулирование по среднему значению осуществляются с помощью переключателя, расположенного на

пульте оператора. Установка заданных значений периода и мощности автоматического регулятора осуществляется при помощи блока задания уставки АРМ — БКЦ-75Р, расположенного также на пульте оператора. Обмен информацией между АРМ и блоком БКЦ-75Р выполняется по последовательному интерфейсу RS-485.

Аппаратура контроля положения стержней и передачи информации

Аппаратура контроля положения стержней расположена в УНО-200Р2 (блок БВЦ-228Р1) и предназначена для преобразования информации от датчиков положения рабочих органов ПТП-22 с последующим представлением на пульте оператора.

Блоки БВЦ-228Р и БВЦ-228Р1 осуществляют прием информации по интерфейсу RS-485, предварительную её архивацию в течение 300 мс и форматирование для передачи по интерфейсу RS-485 на блоки связи БВЦ-225Р с целью последующего отображения на дисплеях пульта оператора БЩУ и оперативном дисплее РЩУ, а также поддерживают связь по интерфейсу Ethernet с аппаратурой диагностики и протоколирования. Блок БВЦ-228Р выполнен с применением микропроцессора и модулей фирмы Octagon Systems, преобразователей фирмы Analog Devices, модулей на дискретных элементах, разработанных в «ССА».

Аппаратура отображения, регистрации, сигнализации и управления

Аппаратура контроля реакторной установки и состояния исправности комплекса АСУЗ-03Р представлена блоками, расположенными на БЩУ и пульте оператора.

В состав БЩУ входят четыре (по количеству каналов АКНП) цифровых дисплея БИЦ-63Р, отображающих текущие значения мощности и периода. Цифровой дисплей принимает информацию по интерфейсу RS-485 непосредственно от БЗТП. Информация из каналов АКНП выводится на два самопишущих регистратора РП-160 с возможностью выбора контролируемого канала.

На БЩУ и в реакторном зале установлен оптико-звуковой сигнализатор —



**Блок контроля реактивности
и регулирования мощности БНО-70Р**

блок БСР-38Р, предназначенный для звуковой и световой сигнализации в режимах начального пуска и перегрузки топлива.

Оперативная информация на пульте оператора представлена на трех независимых дисплеях, выполненных с применением электролюминесцентных матриц EL640.480-AA1 фирмы Planar. Каждый дисплей функционирует под управлением блока связи БВЦ-225Р и клавиатуры РСМ-301. Блок связи БВЦ-225Р, выполненный на основе модулей фирмы Octagon Systems, осуществляет вывод информации на дисплей и приём сигналов с клавиатуры РСМ-301 для управления

отображением. Информация на каждый блок связи БВЦ-225Р поступает от трех устройств УНО-200Р1 и устройства УНО-200Р2 по независимым интерфейсам RS-485.

По функциям представления информации оператору три дисплея идентичны, переключение слайдов осуществляется при помощи клавиатуры РСМ-301. На каждом оперативном дисплее отображаются (рис. 8) три основных слайда («АКНП», «АКТП», «Сигнализация») и два неоперативных («Время падения рабочих органов» и «Исправность выходов в систему технологической автоматики»).

На пульте оператора размещены четыре блока задания уставок АКНП, блок задания уставок АРМ и ключи управления реакторной установкой.

Аппаратура диагностики и протоколирования

Аппаратура диагностики и протоколирования (АДП) представлена рабочей станцией AWS-825Р фирмы Advantech, выполненной для промышленных применений, и принтером Laser Jet 6L. Рабочая станция принимает информацию от устройств



Цифровой дисплей БИЦ-63Р

УНО-200Р1, УНО-200Р2 и УНО-200Р3 по интерфейсу Ethernet. АДП связана с системой верхнего уровня РАКУРС по второму каналу Ethernet, что обеспечивает гальваническую развязку комплекса АСУЗ-03Р и системы РАКУРС. От этой системы через АДП поступают сигналы единого времени.

АДП предназначена для архивации, отображения и вывода на принтер значений параметров нейтронного потока, теплогидравлических параметров, состояния (положения) органов управления реакторной установкой на пульте оператора. АДП выполняет функцию регистрации первопричины возникновения аварийной ситуации. Максимальное время архивирования — 24 часа с дискретностью 100 мс.

При помощи АДП осуществляется автоматическая предпусковая проверка комплекса АСУЗ-03Р по функции

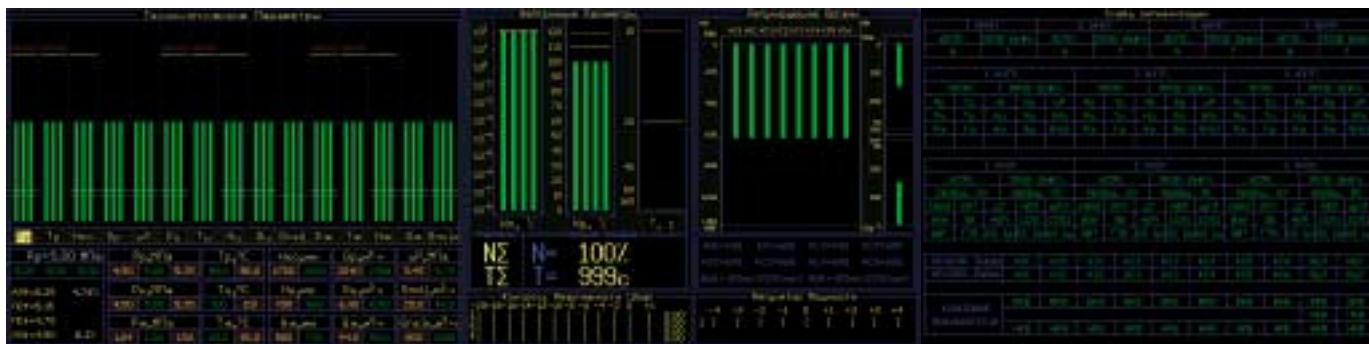


Рис. 8. Копии экранов оперативных дисплеев пульта оператора

прохождения обобщенных управляющих сигналов аварийной защиты и предупредительной сигнализации и проверка срабатывания дискретных выходов к устройствам технологической автоматики. Результаты проверок распечатываются на принтере.

Аппаратура резервного щита управления

Каналы АKNП для РЩУ

идентичны уже описанным каналам защиты и выполнены с применением аналогичных блоков и устройств. Отличие заключается только в том, что сигналы АЗ-Н, ПС-Н, АЗ-Т, ПС-Т не принимают участия в формировании управляющего сигнала аварийной защиты.

Аппаратура РЩУ состоит из двух независимых каналов контроля по параметрам нейтронного потока, аппаратуры отображения и регистрации. Каждый канал содержит устройство детектирования УДПН-20Р и устройства контроля УНО-200РЗ (блок БПМ-80Р). Аппаратура РЩУ расположена в отдельном здании. На оперативный дисплей РЩУ выводится текущая информация по двум каналам контроля параметров нейтронного потока и вся текущая информация о состоянии СУЗ, аналогичная информации на дисплеях пульта оператора. На самопишущем регистраторе РП-160 фиксируются значения мощности, усредненной по двум каналам АKNП РЩУ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С 1999 года «ССА» имеет лицензию ISO-9001 на производство аппаратуры в соответствии с международными стандартами.

Комплекс АСУЗ-03Р выполнен в соответствии с требованиями МАГАТЭ, ПБЯ ИР и ГОСТ Российской Федера-



Пульт оператора с тремя независимыми дисплеями Planar

ции; разработка, изготовление и испытания проводились под надзором ГАН РФ (ГосАтомНадзор России).

Комплекс АСУЗ-03Р создан с применением передовых технологий в области разработки, процессов конструирования и изготовления. Это привело к сокращению сроков изготовления и поставки оборудования на объект. Применение микропроцессорной техники позволило построить комплекс, адаптируемый к различным проектам.

Программное обеспечение для аппаратуры АKNП, АКТП, АЛОС является вновь созданным продуктом класса 2, ранее не применявшимся, разработанным для определенной конфигурации технических средств. Отсутствие в этом программном обеспечении базовых и операционных систем делает его «прозрачным» для процесса верификации вплоть до уровня кода программ. Процесс разработки и верификации осуществлялся согласно МЭК 60880.

Аппаратура комплекса АСУЗ-03Р в рамках Государственных приёмо-сдаточных испытаний прошла все виды испытаний, регламентируемых техническим заданием: функциональные, климатические, механические, электромагнитные — и готовится к отправке на объект.

В настоящее время на основе опыта создания комплекса АСУЗ-03Р, функциональной и конструктивной формализации интегрированного канала разрабатываются аналогичные системы управления и защиты для исследовательских реакторов ряда атомных научных центров.

«ССА» является сторонником консервативной политики в области систем безопасности атомных реакторов, предусматривающей применение и развитие технических средств на «жесткой» логике.

Тем не менее считается необходимым и важным накопить опыт эксплуатации аппаратно-программного комплекса АСУЗ-03Р на исследовательских реакторах для подготовки объективных предложений по использованию принципиально новых технических решений в аналогичных системах для АЭС.

Авторы выражают признательность Жернову В.С. и Пронякину А.В. за постоянный интерес и помощь в выполнении настоящей работы, а также Шишкину И.В., Тебейкину И.Б., Купчику В.И., Портнягину А.Ю., Стефаничкой Л.О., Иванову И.Д. и другим сотрудникам «ССА», принимавшим активное участие в разработке и настройке комплекса. Авторы благодарят представителей ПИЯФ АН РФ Смольского С.Л., Потапенко Г.Т., Евсеева Ю.В. за постановку задач и полезные советы, сотрудников ОКСАТ НИКИЭТ Кондратьева В.В. и Новоселову Л.С. за постоянное творческое взаимодействие. ●

**Авторы — сотрудники
ЗАО «СНИИП-СИСТЕМАТОМ»
Телефоны: (095) 198-4591,
198-7556**