

Новые системы управления аварийной защитой энергетических реакторов.

Жернов В.С., Заикин А.А., Мирошник Ю.М., Пронякин А.В., Соколов И.В.

В статье рассматриваются современные комплексы для системы управления аварийной защитой реакторных установок, разработанные ССА и эксплуатируемые на ряде АЭС с ВВЭР и атомных научных центрах. Приводятся результаты внедрения аппаратуры и рассматриваются ближайшие перспективы применения структурных и технических решений в комплексах систем управления и защиты для энергетических реакторов.

На современном этапе развития процессорной и цифровой программируемой техники с характерным наличием доступных и мощных средств проектирования, аппаратная реализация АСУ ТП стала доступна многим производителям. Создание технических средств обладающих расширенными эксплуатационными характеристиками так же не является проблематичным, т. к. улучшилась технология изготовления.

При проектировании аппаратуры систем управления и защиты (СУЗ) реакторных установок наиболее важными параметрами являются надежность и быстродействие, определяющих безопасность и безотказную работу реактора. Эти параметры зависят не только от технической реализации, но и от структурного построения системы аварийной защиты и алгоритмов работы ее составных частей, нарабатываемых опытом разработки и внедрения аппаратуры СУЗ.

В настоящее время существуют два основных подхода к структурному построению СУЗ, во-первых, традиционная и референтно-надежная “ниточная” (или канальная) структура, при полной независимости каналов, во-вторых, шинная иерархическая структура на нескольких уровнях иерархии, использующая для передачи сигналов управления аварийной защитой быстродействующие сетевые интерфейсы.

Из структурных концепций построения систем вытекает оптимальная техническая реализация СУЗ, которая заключается в следующем:

- канальные СУЗ могут быть построены как с применением “жесткой” логики в системе управления аварийной защиты, так и выполненными на процессорной технике;
- шинные СУЗ неизменно должны быть разработаны с применением высокопроизводительных процессоров и использовать операционные системы для организации сетевых интерфейсов (Ethernet, Profibus и т.п.) для передачи сигналов важных для безопасности.

Высокая вероятность безотказной работы для СУЗ достигается контролем одноименных параметров несколькими независимыми устройствами, включая детекторы физических величин.

Важным параметром, характеризующим СУЗ РУ, является взаимозависимость устройств контролирующих одноименные параметры и управляющих аварийной защитой. Такая взаимозависимость ведет, с одной стороны, к расширению диагностических функций по сравнению информации контролируемых одноименных параметров, с другой стороны – к увеличению времени формирования выходного управляющего сигнала аварийной защиты. Это заключение сделано на основе технических характеристик микропроцессорных СУЗ TELEPERM-XS (Siemens, Германия) [1], SPIN (Merlin Gerin, Франция) [2].

Возможности системы автоматического проектирования так же зависит от структурных концепций СУЗ РУ. Наличие сетевых интерфейсов и доступа к любому

компьютеру при шинной иерархической архитектуре способствует созданию единого центра проектирования и реконфигурирования всей системы. Примером такой системы проектирования является центральный компьютер системы TELEPERM-XS, на котором установлена аттестованная, в соответствии с требованиями МЭК, среда разработки SPACE (SPecification And Coding Environment). В этом случае немаловажным является оценка влияния систем проектирования на безопасность СУЗ в целом.

Канальные структуры СУЗ, вследствие отсутствия информационной зависимости между составляющими устройствами, имеет возможность только лишь канального проектирования, по своему построению не влияющего на безопасность. Окончательная проверка конфигурации и исправности аппаратуры СУЗ в целом возложена на аппаратуру архивации, диагностики и протоколирования единую для всей системы.

ЗАО СНИИП-СИСТЕМАТОМ (ССА) (до недавнего времени отделение НИЦ СНИИП) занимается проектированием, разработкой, производством, пусконаладочными работами и авторским надзором систем важных для безопасности реакторов типа ВВЭР более 30-ти лет. За это время ССА оснастило комплексами аппаратуры системы управления и защиты реакторных установок (АСУЗ РУ) около 50-ти блоков АЭС с ВВЭР, в России, странах СНГ и за рубежом, а так же исследовательские реакторы в Ливии и Вьетнаме [3].

За истекший период ССА выработал принципы и концепции построения комплексов АСУЗ РУ, подтверждающиеся многолетним безотказным опытом эксплуатации, это – канальный принцип построения системы управления аварийной защиты, разделение каналов по решаемым задачам, независимость таких каналов, гибкость, универсальность и оптимальная избыточность технических средств, модульность построения устройств и блоков.

Техническая концепция комплексов АСУЗ РУ развивалась с развитием аналоговой, цифровой и процессорной техники. Первые комплексы АСУЗ РУ были разработаны на основе аналоговой и частично цифровой техники и длительное время эксплуатировались на энергетических и исследовательских реакторах. Затем, впервые в мировой практике была разработана и введена в эксплуатацию на 2 блоке Ровенской АЭС (1987 год) аппаратура контроля нейтронного потока для СУЗ ВВЭР-440, выполненная на дискретной цифровой технике (“жесткой” логике), названная АКНП-7, которая до сего времени эксплуатируется на ряде АЭС с ВВЭР, как в России, так и за рубежом [4].

Появление на российском рынке зарубежных комплектующих изделий и вычислительных модулей с улучшенными техническими характеристиками и большой наработкой на отказ незамедлительно сказалось на качестве продукции, в том числе на повышении гибкости и унификации технических средств при сохранении и улучшении надежности. Все это сочеталось с применением новых технологий в разработке, проектировании, сборке и монтаже аппаратуры.

Современные комплексы АСУЗ РУ решают большой ряд задач по управлению аварийной защитой и контролю ВВЭР (таблица 1).

Отличительной особенностью последних комплексов АСУЗ-РУ является введение коррекции показаний аппаратуры контроля мощности реактора с учетом энергораспределения по активной зоне, температуре теплоносителя и положения групп органов регулирования [5].

Таблица 1

- | |
|--|
| <ul style="list-style-type: none">• контроль нейтронного потока при первом пуске, перегрузки топлива и выполнении функций аварийной защиты;• защита и контроль по мощности и периоду реактора;• контроль энергораспределения и локальных защит;• защита и контроль по технологическим параметрам реактора;• защита и контроль по сейсмической активности;• логическая обработка и формирования аварийных команд для силовых панелей СГИУ и управления арматурой;• контроль мощности и периода при первом пуске реактора и перегрузке топлива;• контроль реактивности;• автоматическое регулирование мощностью реактора;• разгрузка и ограничение мощности;• контроль состояния внутрикорпусных устройств;• сигнализация первопричины срабатывания аварийной защиты;• отображение оперативной информации на пульте БПУ, щите РПУ, перегрузочной машине и пульте физика;• диагностика, архивация, протоколирование и передача информации в СВБУ, ИВС. |
|--|

Примечание: СГИУ – система группового и индивидуального управления рабочими органами СУЗ;
БПУ – блочный пульт управления;
РПУ – резервный пульт управления;
СВБУ – система верхнего блочного уровня;
ИВС – информационно-измерительная система.

Основой технической политики ССА в части систем управления аварийной защитой остается принцип разумного консерватизма, заключающийся в применении апробированных концепций и решений. Оптимальным считается использование для аппаратуры системы управления аварийной защитой энергетических реакторов технических средств равнозначных по своему принципу работы “жесткой” логики. Такой референтно-надежный подход к решению задач важных для безопасности энергетических реакторов наиболее предпочтителен и используется в настоящее время на всех АЭС в России и большинстве АЭС за рубежом.

Тем не менее, признавая, что возможности технических средств на основе процессорной техники, в том числе качество программного обеспечения, будут неизменно прогрессировать, ССА выпускает и предлагает на рынок две модели комплексов АСУЗ РУ и ряд технических средств для управляющей системы безопасности, построенных по вышеупомянутым принципам.

Первая модель АСУЗ РУ и технических средств, применяемая в настоящее время на энергетических реакторах, выполнена на основе дуального подхода к реализации функций защиты и контроля. При этом для функций управления аварийной защитой традиционно используется цифровая техника – программируемые логические матрицы (ПЛИС), принцип работы которых равнозначен “жесткой” логике. Функции контроля, вычисления, диагностики и мониторинга выполнены с использованием процессорной техники при не влиянии на функции управления аварийной защитой. Реализация ранее зарекомендовавших себя алгоритмов работы на промышленных ПЛИС с необходимыми эксплуатационными параметрами и показателями надежности, является на данный момент единственным эффективным средством для создания референтных, высоконадежных, быстрых и гибких систем для решения специфических задач систем безопасности.

В отличие от микропроцессорных систем управления аварийной защитой, современными представителями которых для энергетических реакторов являются

TELEPERM-XS, SPIN, EAGLE, аппаратура предлагаемая ССА не является программно-управляемой, так как не содержит процессорных модулей, операционной системы, прикладного и вообще какого-либо программного обеспечения. Правильность функционирования модулей, устройств и аппаратуры в целом на основе ПЛИС может быть полностью достоверно и однозначно проверена и подтверждена на всех этапах проектирования - при разработке, изготовлении и испытаниях, без использования специальных методов и средств, относящихся к программно-управляемой технике.

Опыт эксплуатации комплексов АСУЗ РУ с применением ПЛИС семейства MAX7000S фирмы Altera на АЭС подтверждает прогнозируемую высокую надежность этих схем – примерно один отказ на миллиард [6]. Данные эксплуатации аппаратуры СУЗ РУ, разработанной ССА [7,8], за период с 1999 по 2005 годы приведены в таблице 2.

Таблица 2

АЭС	Блок, устройство	Количество ПЛИС ALTERA		Дата ввода в эксплуатацию	Наработка, ПЛИС × часы на май 2005г.
		В одном устройстве	Всего		
РОВЕНСКАЯ					
Блок № 1	БУП-35Р1	12	96	Май 2001	3 216 240
Блок № 2	БУП-35Р1	12	96	Август 2001	3 004 272
Блок № 3	БУП-35Р	8	64	Март 2002	1 677 930
КОЛЬСКАЯ					
Блок № 1	АЛОС-04Р	24	144	Ноябрь 1999	6 756 464
	АСАВБС-01Р	73	438	Июнь 2003	6 666 768
	АСПСАЭ-01Р	7	42	Июнь 2003	641 232
Блок № 2	АГЦН-01Р	8	48	Июнь 2003	732 528
	АСАВБС-01Р	73	438	Сентябрь 2004	1 873 296
	АСПСАЭ-01Р	7	42	Сентябрь 2004	181 584
Блок № 3	БУП-35Р	8	96	Март 2001	3 361 392
Блок № 4	БУП-35Р	8	96	Апрель 2001	3 289 968
БАЛАКОВСКАЯ					
Блок № 4	БУП-35Р	8	64	Февраль 2003	1 163 376
НОВОВОРОНЕЖСКАЯ					
Блок № 5	БУП-35Р	8	64	Август 2003	880 896
СМОЛЕНСКАЯ					
Блок № 1	БУП-35Р	8	32	Ноябрь 2004	84 336
КАЛИНИНСКАЯ					
Блок № 1	БУП-35Р	8	64	Октябрь 2004	229 488
Блок № 3	АЗТП-03Р	120	840	Сентябрь 2004	3 590 640
	АЗТП-03Р1	120	1170		5 000 400
	АЛОС-05Р	48	336		1 437 552
	АЛОС-05Р1	93	930		3 975 120
«ТЯНЬВАНЬ»					
Блок № 1	АКНП-16Р	47	188	Март 2004	1 635 504
И Т О Г О :			5 288		49 398 986

Примечания: БУП - блок управления импульсным предохранительным клапаном.
 АЛОС - аппаратура логической обработки сигналов;
 АЗТП - аппаратура защиты по технологическим параметрам;
 АСАВБС - аппаратура управления системой аварийного ввода бора и сплинклерной системой;
 АСПСАЭ - аппаратура ступенчатого пуска системы автоматического энергоснабжения;
 АГЦН - аппаратура автоматизации главных циркуляционных насосов;
 АКНП - аппаратура контроля нейтронного потока

В общей сложности за период с 1999 года по настоящее время в аппаратуре для СУЗ АЭС с ВВЭР ССА было использовано выше 5000 чипов производства фирмы

Altera с общей наработкой около 50 млн. часов. За этот период не было зарегистрировано ни одного отказа.

В частности референтность такого рода аппаратуры для АЭС - это более пяти лет безотказной и безаварийной работы на 1 блоке Кольской АЭС.

Сделав в 1998 году оптимальный выбор в направлении развития - применив программно-конфигурируемую технику равнозначную “жесткой” логике в СУЗ, ССА получил явное преимущество в унификации и гибкости оборудования. Так, на 1 блоке АЭС Моховце (Словакия, 1998 год) потребовалось примерно 1500 человека часов для доработки ранее заложенных алгоритмов в логику работы СУЗ, которая была выполнена на дискретной цифровой техники (серия 564). Для сравнения – изменение (более 30 вариантов) алгоритмов работы логики СУЗ на 3 блоке Калининской АЭС (2005 год), проводившиеся при помощи САПР для ПЛИС, заняли около 30 человека часов.

Одна из последних работ – ввод в эксплуатацию иницирующей части СУЗ и пуск реактора ВВЭР-1000 3-го энергоблока Калининской АЭС.

Особенность этого комплекса АСУЗ РУ следующая. Как известно, традиционные параметры АКНП, которыми являются мощность и период, не пропорциональны значению тепловой мощности реактора, что негативно сказывается на управлении аварийной защитой. Для решения этой задачи в аппаратуре контроля нейтронно-физических параметров для Калининской АЭС впервые в практике российских АЭС разработаны алгоритмы и технические средства, учитывающие аксиальное распределение, положение управляющих групп и температуру теплоносителя в опускном участке. Аппаратура выполняет следующие функций:

- контроль реактивности активной зоны во всем диапазоне измерения мощности от подкритического состояния до номинального значения;
- контроль среднего аксиального энергораспределения в активной зоне, значения аксиального коэффициента неравномерности и аксиального офсета;
- контроль максимального для активной зоны значения линейного энерговыделения и минимального значения запаса до его допустимого значения (с учетом зависимости допустимого значения от вида ядерного топлива и степени его выгорания);
- контроль минимального по активной зоне значения запаса до кризиса теплообмена.

Экспериментально подтверждено надежное выполнение всех перечисленных функций, совпадение всех контролируемых величин с данными СВРК в стационарных режимах и заметно более высокое, чем в СВРК, качество контроля в переходных процессах.

Перечисленные параметры контролируются независимо каждым каналом АКНП, обеспечивая возможность выявления азимутальной неравномерности их распределения.

На основе сигналов рабочего диапазона АКНП разработана и внедрена аппаратура частотно-фазового анализа спектра флуктуаций сигналов нейтронных детекторов (АК ВКУ), обеспечивает контроль спектральных характеристик сигналов штатных нейтронных детекторов АКНП в диапазоне частот от 0,1 до 55 Гц. Совместная обработка сигналов по нескольким каналам АКНП позволяет выделить маятниковые колебания шахты реактора, связанные с износом фиксирующих элементов и измерить их амплитуду с точностью $\pm 0,005$ мм

Данная аппаратура обеспечивает автоматическую коррекцию показаний АКНП в рабочем диапазоне контроле реактора с погрешностью, не превышающей 1,5%

тепловой мощности, что позволяет снизить запас до уставки аварийной защиты по мощности с 7 до 3 %. Как следствие появляется принципиальная возможность увеличения выработки электроэнергии. Кроме того, аппаратура характеризуется тем, что для контроля энергораспределения достаточно теперь 12 – 16 сборок КНИ (вместо 50 ÷ 60 сборок). Открываются практические перспективы совмещения комплексов АСУЗ РУ с системой внутрореакторного контроля (СВРК) и возможность сокращения числа сборок КНИ, сокращение затрат и главное снижение дозовых нагрузок на персонал при замене КНИ.

Процесс пуска 3-го энергоблока Калининской АЭС представлен на диаграммах (рисунок 1 и 2), которые свидетельствуют о высокой чувствительности установленной аппаратуры контроля нейтронного потока (октябрь 2004 года).

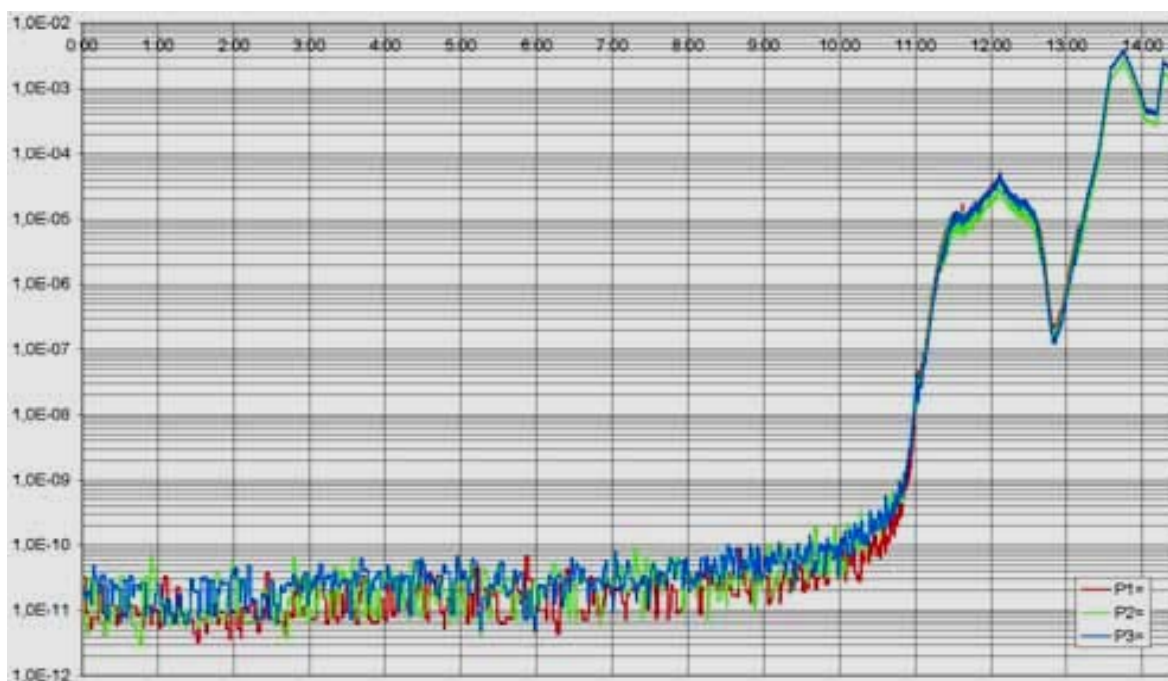


Рисунок 1. Мощность

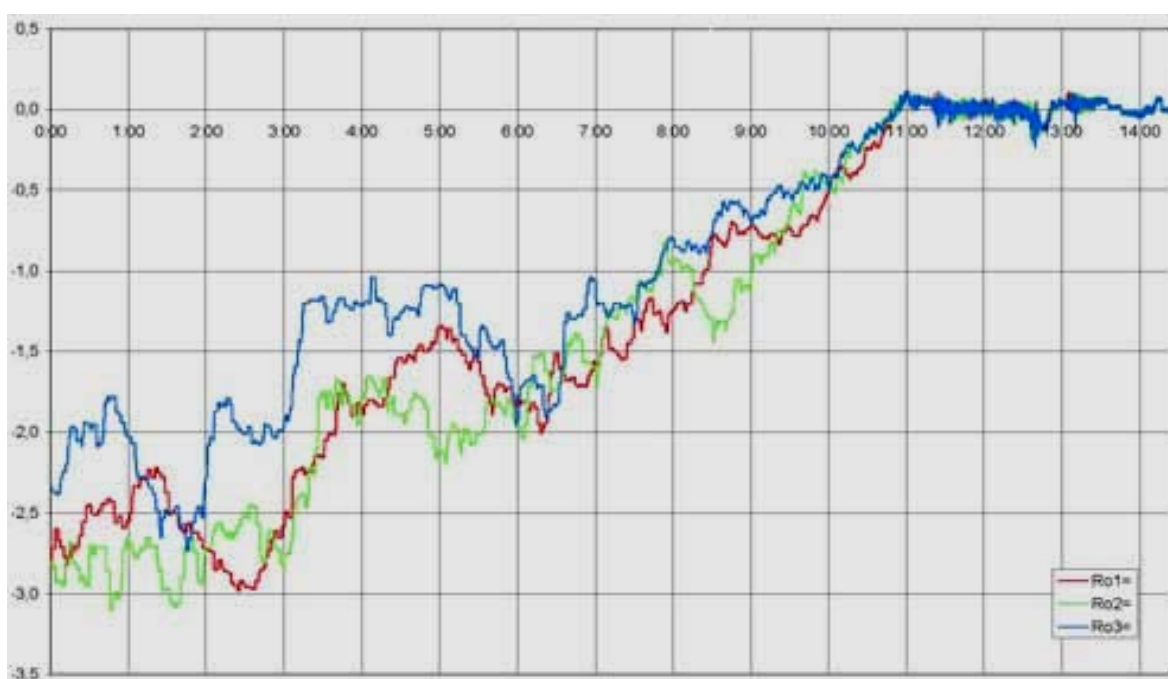


Рисунок 2. Реактивность

Через некоторое время появится возможность сравнить основные характеристики по надежности программно-конфигурируемой техники ССА (АКНП-16Р) и программно-управляемой техники SIEMENS (TELEPERM-XS), установленную и работающую совместно в СУЗ на 1 и 2 блоке АЭС Тяньвань (Китай).

Представляется, что для применения СУЗ на основе микропроцессорных средств необходимо получить референтность работы такой аппаратуры на тех объектах атомной энергетики, где событие срабатывание аварийной защиты является менее значимо, чем останов энергетического реактора. Такими объектами являются исследовательские реакторы, цикл работы которых составляет от одного дня до нескольких недель.

Вторая модель комплекса АСУЗ РУ, имеющая референтность использования на ряде исследовательских реакторах, разработана на основе микропроцессорной технике в системе управления аварийной защитой. Аппаратуры СУЗ для исследовательских ядерных реакторов (АСУЗ-ИЯР) подчиняется основным принципам и концепциям построения аппаратуры ранее разработанным ССА. Комплекс АСУЗ-ИЯР построен по канальной структуре для функций управления аварийной защитой и шинной структуры для мониторинга и диагностики, и обеспечивает управление аварийной защитой и контроль реакторной установки по нейтронным и технологическим параметрам [9,10]. Принцип совмещения канальной и шинной структур комплекса АСУЗ-ИЯР, расширяет контрольные и диагностические функции при сохранении основных характеристик – надежность и быстродействие. Отсутствие операционных систем и заимствованных программ для управляющей системы безопасности предоставило возможность практически исключить ошибки в разработанном программном обеспечении и аттестовать оборудования комплекса АСУЗ-ИЯР для применения во 2 классе безопасности по ОПБ.

Для аппаратуры системы управления аварийной защитой комплекса АСУЗ-ИЯР используется комбинированные технические решения - микроконтроллеры для вычислительных задач, ПЛИС для фильтрации входных сигналов и выполнения логических функций. Технические решения и программное обеспечение для микроконтроллеров полностью разработаны в ССА. Такой подход является наиболее оптимальным с точки зрения международных требований по верификации программного обеспечения.

Оборудованием комплекса АСУЗ-ИЯР оснащены ряд исследовательских центров в России, аппаратура поэтапно вводится в эксплуатацию (таблица 3).

Таблица 3

ИЯР	комплекс	Эксплуатируемая часть аппаратуры	тип процессора	дата ввода в эксплуатацию
Гатчина, ПИЯФ физмодель ПИК	АСУЗ-03Р	АКНП	DS87C530	июнь 2003
Обнинск, НИФХИ ВВР-Ц	КУСБ-01Р	АКНП, АРМ	DS87C530	июль 2003
Димитровград, НИИАР МИР.М1	АСУЗ-09Р	АКНП	DS87C530	Сентябрь 2004

Примечания: АСУЗ – аппаратура системы управления и защиты;
 КУСБ – канал управляющей системы безопасности;
 АКНП – аппаратура контроля нейтронного потока;
 АРМ – автоматический регулятор мощности.

Результаты внедрения комплекса АСУЗ-ИЯР на исследовательском реакторе МИР.М1 (Димитровград, Россия) и ряд экспериментов подтвердили высокие эксплуатационные и технические характеристики установленного оборудования, первые результаты показаны на рисунке 3.

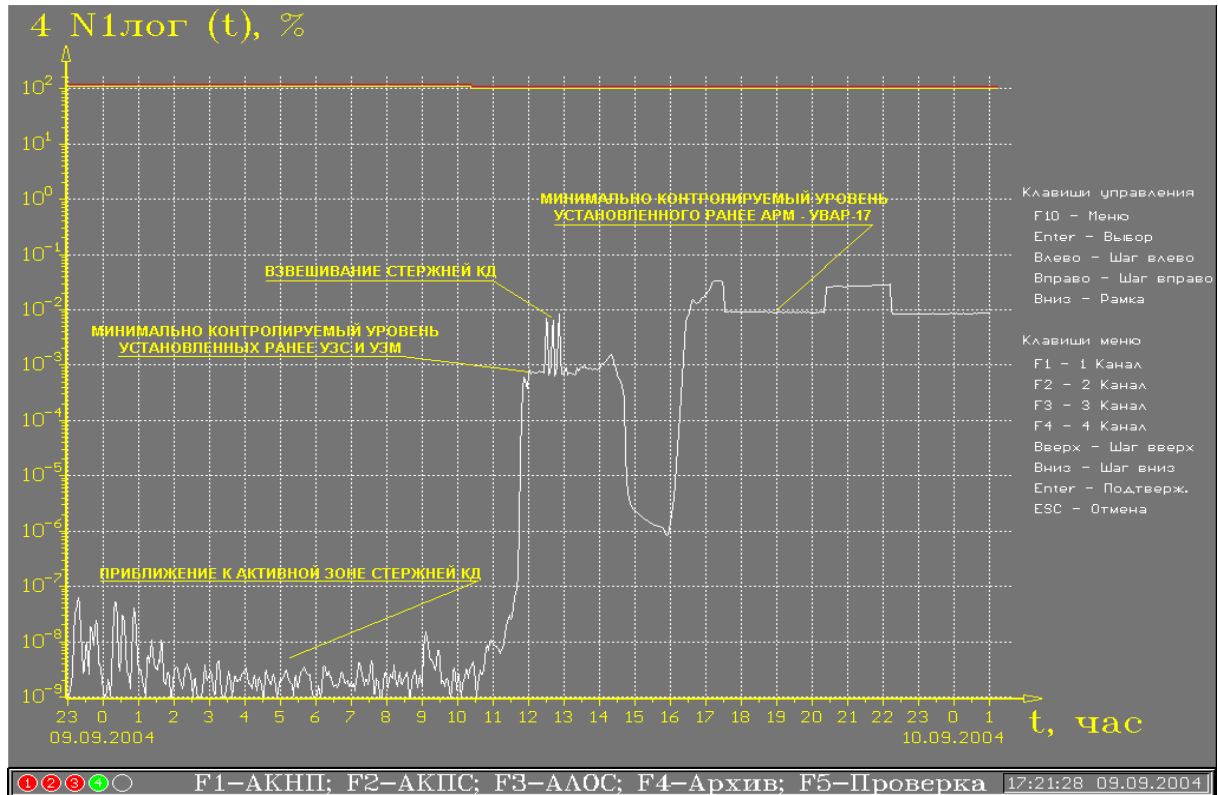


Рисунок 3. Контроль мощности реактора МИР.М1 с помощью аппаратуры контроля нейтронного потока комплекса АСУЗ-ИЯР. (НИИАР, Димитровград, сентябрь 2004 г.)

В данном случае для контроля потока нейтронов используется импульсно-токовая ионизационная камера, работающая в 12 десятичных порядках (от 10^{-1} до 10^{11} нейтр./см²×с).

В настоящее время идет процесс накопления фактических данных для статистической обработки и оценки реальной надежности программно-управляемых технических средств комплекса АСУЗ-ИЯР на исследовательских реакторах с целью в ближайшее время рекомендовать к применению данную аппаратуру для СУЗ РУ АЭС.

Используя опыт ССА тем же принципам в реализации технических решений последовал ряд предприятий Украины, начинающих производить логическую и вычислительную часть аппаратуры СУЗ РУ для ВВЭР.

Достаточно быстро прогрессирует в своих разработках ЗАО «РАДИЙ» (Кировоград, Украина), которое на базе поставленного ССА на Южно-Украинскую АЭС в 1997 году комплекса технических средств второго поколения для УСБ-А3, ПЗ и опыта российских предприятий, разработало ряд аппаратных средств с применением ПЛИС. Отсутствие аппаратуры АКНП (включая устройства детектирования) делает данную аппаратуру структурно незавершенной. К тому же, многократное мажоритарное сложение одного и того же сигнала, поступающего с блока

детектирования, выглядит, как отсутствие концепций в структурных решениях СУЗ и можно предположить о невысокой надежности применяемых алгоритмов [11].

Аналогично СНПО “ИМПУЛЬС” (Северодонецк, Украина) на основе технических решений и алгоритмов комплекса АКНП-7 повторил вычислительную часть на основе микроконтроллеров и по-прежнему использует блоки детектирования и нормирующие преобразователи разработки ССА, формирующие нормализованный сигнал (частоту) [12].

Как уже отмечалось, создание СУЗ для реакторных установок достаточно специфическая задача с вполне определенными характеристиками и предъявляемыми требованиями. Сохранение технических и эксплуатационных характеристик, а так же их улучшение при снижении затрат на изготовление и сокращение времени на ввод в эксплуатацию неизменно приводит к повышению конкурентоспособности аппаратуры. Пути решения этих задач лежат в повышении степени функциональной интеграции и унификации оборудования.

Интеграция, при современном подходе к технической реализации задач, приводит к снижению потребления оборудования на единицу выполняемой функции и увеличению устойчивости к помехам. Унификация на наш взгляд не должна быть чрезмерной, в основу должно ставиться выполнение заданных функций с минимальным временем и энергетическими затратами при оптимальной избыточности технических средств.

Полученные предварительные результаты опытной эксплуатации позволяют предложить на рынок качественно новые решения по структурному построению и технической реализации АСУЗ-РУ для АЭС с ВВЭР. ССА предлагает два завершенных типа комплексов АСУЗ РУ, выполненных по одинаковым принципам, но с применением различных технических подходов к реализации отработанных алгоритмов.

Первая модель комплекса АСУЗ РУ для системы аварийной защиты выполнена на основе алгоритмов и технических средств, характерных для “жесткой” логики – комплекс АСУЗ-УСБИ. Для этих целей используются ПЛИС с высокой степенью интеграции, позволяющие в десятки раз сократить объем оборудования. Особенность предлагаемых технических решений является дальнейшее расширение функций контроля и диагностики, включая исправность линий связи, а так же, что не маловажно, добиться полного отсутствия влияния контроля на формирование сигналов управления аварийной защитой.

Комплекс построен по канальной структуре и поддерживает конфигурацию системы аварийной защиты по логике 2 из 3 (два комплекта) или 2 из 4 на трех уровнях мажоритарного сложения.

Комплекс АСУЗ-УСБИ состоит из подсистемы управления аварийной защитой (УСБ-АЗ/ПЗ) и подсистемы контроля технологического оборудования (УСБ-Т) (рисунок 4).

Подсистема УСБ-АЗ/ПЗ выполняет следующие функции:

- контроль и формирование управляющих сигналов для аварийной защиты по технологическим параметрам, формирование управляющих сигналов в соответствии с логикой работы СУЗ, формирование сигналов защиты и первопричины (АФСЗП);

ПОДСИСТЕМА ИНИЦИИРУЮЩЕЙ ЧАСТИ СУЗ-УСБИ КОМПЛЕКС АСУЗ-УСБИ

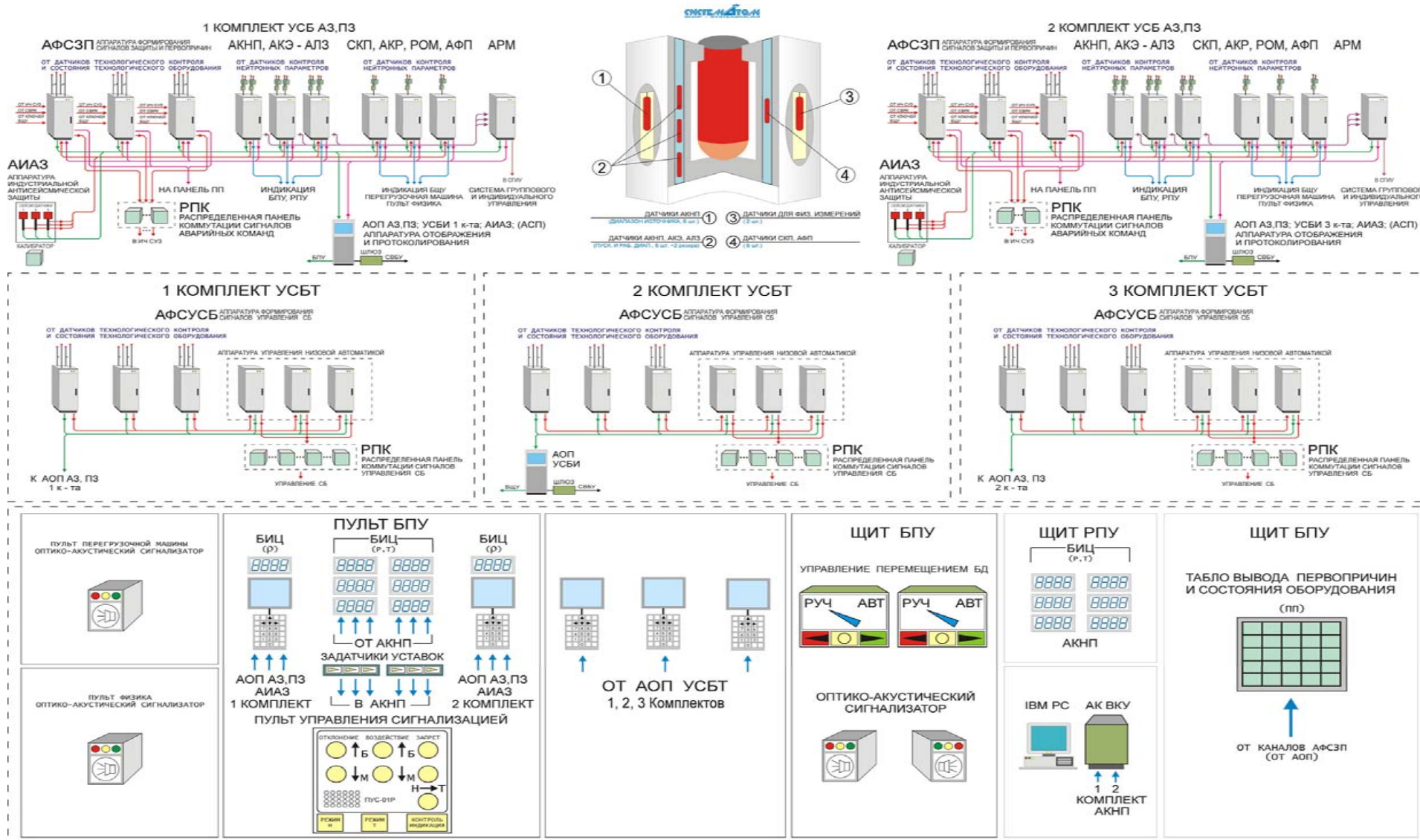


Рисунок 4 Предлагаемая структура комплекса иницирующей части СУЗ для ВВЭР-1000, построенная с использованием программно-конфигурируемой техники равнозначной “жесткой” логике в системе управления аварийной защитой.

- контроль и формирование управляющих сигналов для аварийной защиты по мощности и периоду (АКНП);
- формирование защитных сигналов по локальным параметрам (АЛЗ);
- контроль и формирование сигналов антисейсмической защиты (АИАЗ);
- контроль энергораспределения (АКЭ);
- контроль перегрузки топлива (АКП);
- контроль первого пуска реактора (АПП);
- разгрузка и ограничение мощности (АРОМ);
- автоматическое регулирование мощности (АРМ);
- отображение, архивация и протоколирование информации (АОП).

В аппаратный состав комплекса АСУЗ-УСБИ включены технические средства контроля нейтронно-физических параметров используемые для аналогичных задач АЭС Тяньвань, это – устройство АКНП, АКЭ, АЛЗ и устройство АКП, АКР, АРОМ, АПП [13].

Новым устройством для комплекса АСУЗ-УСБИ является АФСЗП (рисунок 5), совмещающее выполнение нескольких функционально сочетающихся задач:

- прием информации от датчиков технологических параметров (давление, уровень, расход, температура);
- прием информации от датчиков контроля состояния основного технологического оборудования (ОТО);
- прием информации от аппаратуры АКНП о превышении пороговых значений мощности и периода;
- прием информации от датчиков состояния исполнительной части СУЗ (ИЧ СУЗ);
- прием информации от аппаратуры СВРК;
- прием информации о превышении пороговых значений сейсмической активности;
- формирование сигналов превышения технологическими параметрами установленных пороговых значений;
- логическую обработку принимаемых сигналов в соответствии с перечнем защит;
- формирование первопричин, вызывающих срабатывание защит и передача их на табло первопричины (ПП) БПУ;
- формирование обобщенных сигналов управления аварийной защитой (АЗ, ПЗ, УПЗ) и передача их в исполнительную часть СУЗ;
- передача текущих значений контролируемых параметров, дискретных сигналов защит, результатов контроля и диагностики в АОП.

Аппаратура АФСЗП разработана с применением ПЛИС FPGA и MAX-II на основе алгоритмов и технических решений, имеющих референтность использования в аппаратуре АЗТП, АЛОС, АФАК, АСП.

Особенности подсистемы УСБ-АЗ/ПЗ, разработанной с применением аппаратуры АФСЗП, является, во-первых, повышение надежности за счет увеличения степени интеграции оборудования, оптимизации структуры подсистемы и наличие полного контроля по функции пропуска и ложного срабатывания управляющего сигнала аварийной защиты, включая исправность линий связи. Во-вторых, повышение помехозащищенности, снижение удельного энергопотребления линий связи за счет передачи информации важной для безопасности по дублированным оптоволоконным линиям связи, и как следствие увеличение быстродействия (архивация контролируемых параметров с дискретностью 20 мс). В-третьих, использования принципа троирования до элементов приема обобщенных сигналов АЗ, ПЗ, УПЗ за счет использования распределенных коммутационных панелей, где осуществляется третий этап

мажоритарного сложения по 2 из 3 на твердотельных реле с наличием контроля исправности последнего.

В аппаратуре АФСЗП функции контроля и передачи информации выполнены с применением программно-технических средств, позволяющих автоматизировать проверку защит и проведение калибровок без отключения датчиков с передачей результатов для архивации и протоколирования.

Аппаратура УСБ-Т в зависимости от объема контролируемых параметров может состоять из 3-х или 4-х комплектов аппаратуры АФСЗП. При реализации функций УСБ-Т на основе устройств АФСЗП так же используется принцип троирования до выходных цепей управления арматурой и сложения сигналов по логике 2 из 3 в распределенных коммутационных панелях на выходных силовых элементах, обеспечивая тем самым высокие показатели надежности выходных цепей низовой автоматики.

Основные технические характеристики аппаратуры АФСЗП приведены в таблице 4.



Рисунок 5 Состав устройства для АФСЗП для ВВР-1000 построенного с применением ПЛИС в системе управления аварийной защитой и контроле.

Таблица 4 Основные технические и эксплуатационные характеристики АФСЗП.

Наименование параметра	Характеристика
■ Типы принимаемых нормализованных сигналов	4 ÷ 20 мА, 0 ÷ 5 мА, 0 ÷ 32 мВ, 0 ÷ 16 мВ, 10 ÷ 60 кГц
■ Суммарная приведенная погрешность измерения и срабатывания пороговых схем по технологическим параметрам (без учета погрешности детекторов): - по одиночным параметрам - по разностным параметрам	Не более 0,08 % Не более 0,15 %
■ Постоянная времени измерения и формирования пороговых сигналов по технологическим параметрам (без учета постоянной времени детекторов)	20 мс
■ Количество подключаемых детекторов технологических параметров	Не более 150
■ Вероятность пропуска управляющего сигнала аварийной защиты	$3,5 \times 10^{-8}$
■ Интенсивность отказов по функции ложного срабатывания аварийной защиты	0,03 в год
■ Вероятность пропуска управляющего сигнала на запуск системы безопасности	$2,1 \times 10^{-8}$
■ Интенсивность отказов по функции запуска системы безопасности	0,035 в год
■ Время хранения архивируемой информации	30 дней
■ Дискретность записи в архив	20 мс
■ Диапазон рабочей температуры окружающей среды устройств и блоков	+1 ÷ +50 °С
■ Температура транспортирования	-20 ÷ +50 °С
■ Сейсмические воздействия по МКС-64	9 баллов, 24 метра
■ Электромагнитная защищенность, в том числе прерывания напряжения питания	2 класс по ОПБ: группа-4, критерий качества-А 3 класс по ОПБ: группа-3, критерий качества-А не менее 500 мс, с возможностью аккумуляторной поддержки
■ Потребляемая мощность одного устройства АФСЗП (без принудительной вентиляции)	Не более 200 ВА
■ Мощность рассеиваемая в одном устройстве ■ Напряжение питания комплекса	Не более 180 Вт 155÷264 В; 50 или 60 Гц

Очевидным является возможность технической реализации комплекса АСУЗ для ВЭЭР-1000 с применением микропроцессорной техники в системе аварийной защиты реактора, дающего значительный выигрыш в унификации, интеграции и адаптации оборудования.

Предлагаемая структура системы аварийной защиты на основе микропроцессорной техники традиционно построена по каналному принципу с разделением каналов по решаемым задачам (АКНП, АЗТП, АЛЗ, АЛОС и т.д.). Передача информации между каналами осуществляется по интерфейсным линиям связи с использованием оптоволоконной техники, при сохранении принципа взаимной независимости каналов. В целях повышения надежности, для передачи сигналов важных для безопасности используется дублированные линии связи. Для информационных и диагностических функций применена, как каналная, так и шинная структура обмена информацией, зависящая от требуемой надежности и быстродействия (рисунок 6). Комплекс обеспечивает формирование управляющих сигналов важных для безопасности и мониторинг по контролируемым параметрам. В зависимости от требований проекта системы аварийной защиты может быть построены по мажоритарной логике 2 из 3 или 2 из 4.

Совместное применение микроконтроллеров и ПЛИС с разделением вычислительных и логических функций (АЛОС), позволяет наиболее оптимально реализовать алгоритмы и получить высокое быстродействие аварийной защиты.

Это позволило технически и конструктивно сформировать устройство для канала управляющей системы безопасности, объединив в нем функции управления аварийной защитой и контроля ВЭЭР - УНО-УСБ-АЗ/ПЗ (рисунок 7). Устройство УНО-УСБ-АЗ/ПЗ формирует управляющие сигналы для аварийной защиты в зависимости от контролируемых нейтронно-физических и технологических параметров и обеспечивает расширенный мониторинг по контролируемым параметрам.

В устройстве УСБ предусмотрена предварительная архивация контролируемых параметров (не более 5 минут) и привязка их к единому времени, что позволяет уменьшить дискретность предварительной архивации и повысить точность привязки их к интервалам времени.

Программное обеспечение выполнено без применения операционных систем и заимствованных программ, алгоритмы программного обеспечения имеют референтность применения на исследовательских и энергетических реакторах.

Вследствие модульно-блочной конструкции устройства УНО-УСБ возможна его модификация в зависимости от выполняемых задач - устройство УНО-УСБ-И.

ПОДСИСТЕМА ИНИЦИИРУЮЩЕЙ ЧАСТИ СУЗ-УСБИ

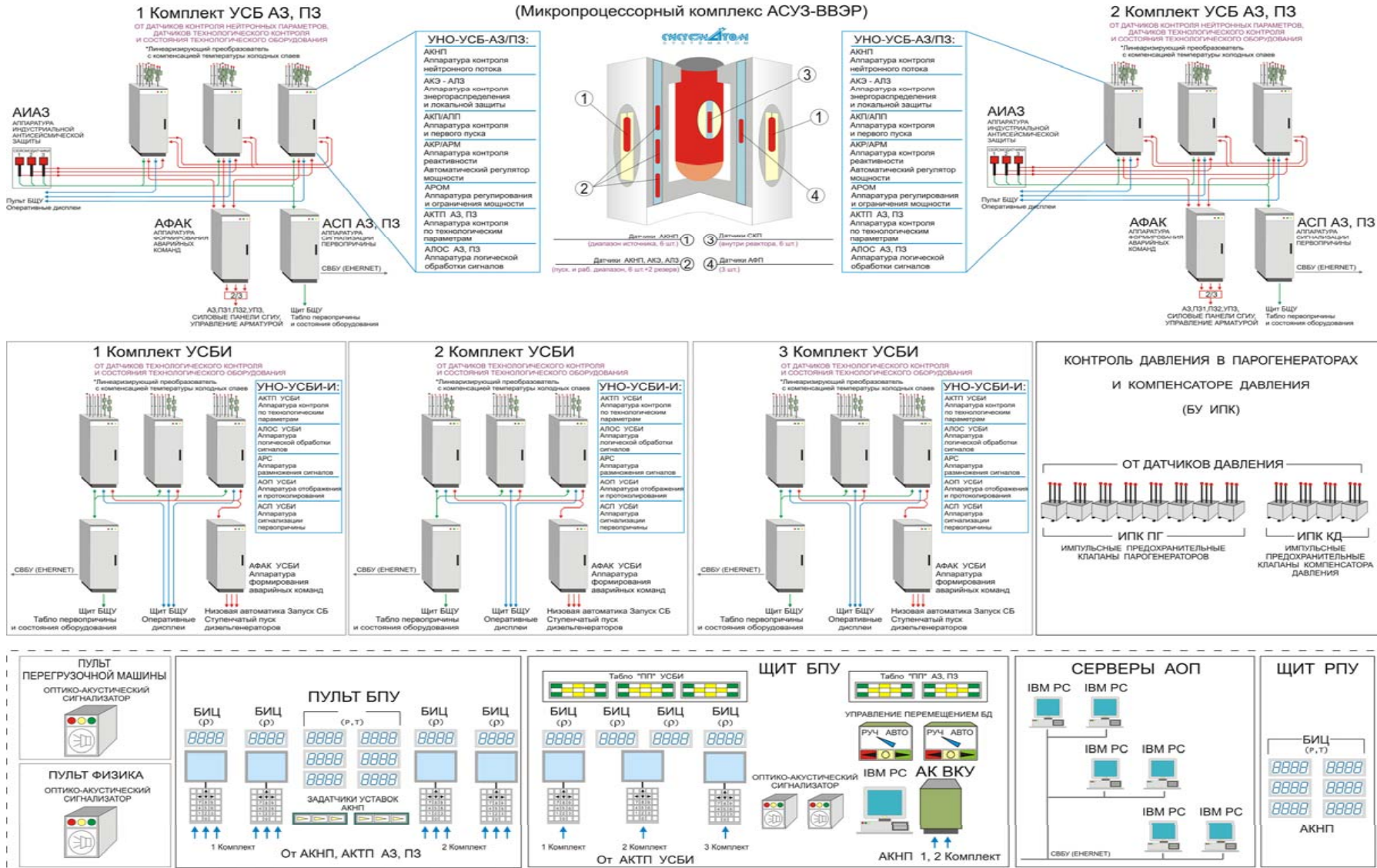


Рисунок 6 Предлагаемая структура комплекса АСУЗ-ВВЭР-1000, построенная с использованием микропроцессорной техники в системе управления аварийной защитой

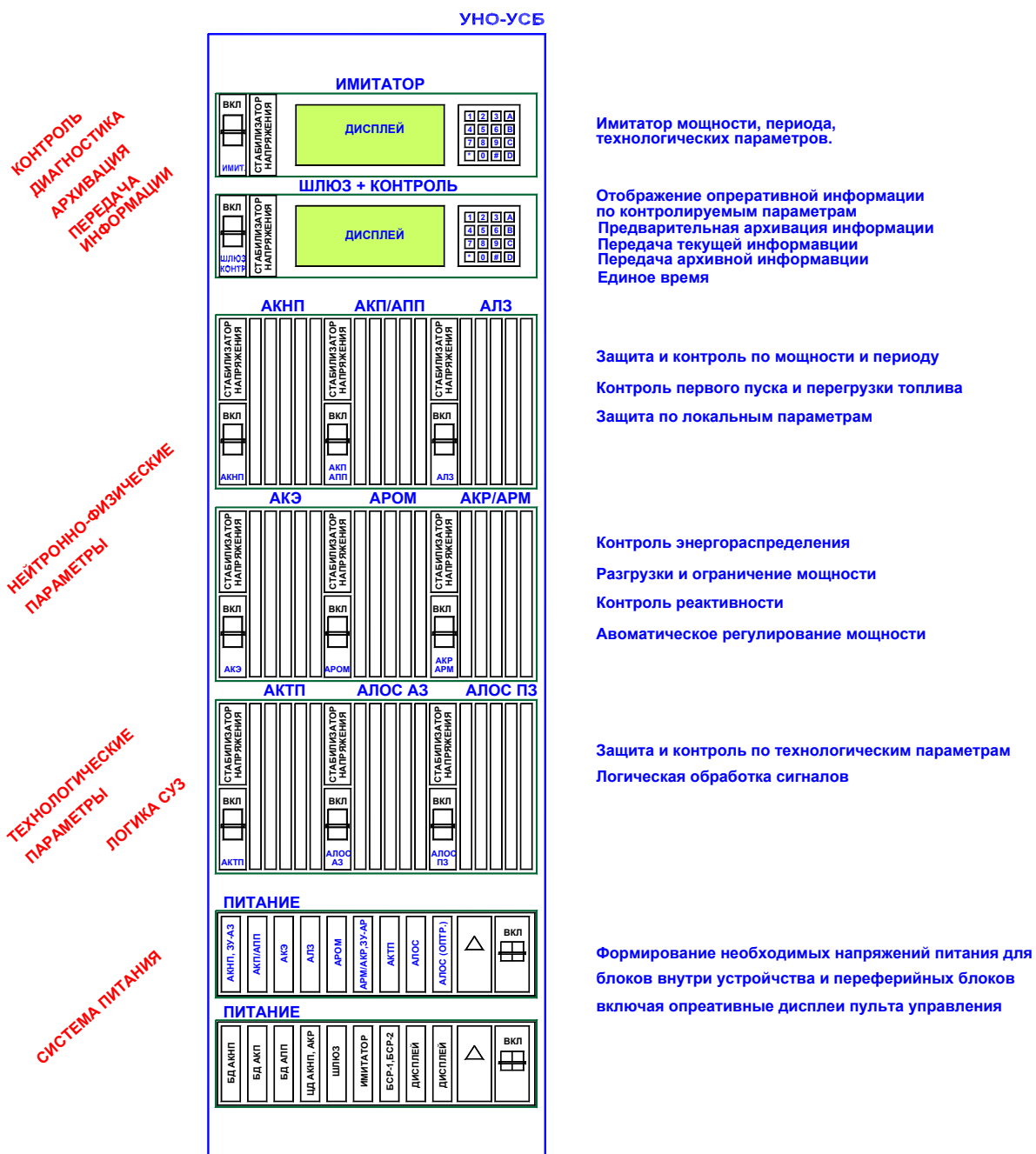


Рисунок 7 Функциональный состав устройства УНО-УСБ для ВВР-1000 построенного с применением микропроцессорной техники в системе управления аварийной защитой и контроле.

В состав комплекса составной его частью входит аппаратура архивации, диагностики и протоколирования, обеспечивающая сбор данных по контролируемым параметрам, диагностику технических и программных средств, защиту от несанкционированного доступа, представление информации внешним пользователям.

Технические характеристики такого комплекса АСУЗ для ВВЭР-1000 представлены в таблице 5.

Таблица 5 Основные технические и эксплуатационные характеристики микропроцессорного комплекса АСУЗ-ВВЭР-1000.

Наименование параметра	Характеристика
■ Диапазон контроля плотности потока тепловых нейтронов	$3 \times 10^{-3} \div 1 \times 10^{10}$ нейтр./ см ² ×с
■ Диапазон контроля реактивности	- 25 ÷ + 1 ρ/β _{эфф}
■ Быстродействие аварийной защиты по мощности в диапазоне контроля от 10 до 120% Nном	Не более 20 мс
■ Типы принимаемых нормализованных сигналов	ток напряжение сопротивление частота
■ Количество принимаемых аналоговых сигналов (одним устройством УНО-УСБ-А3/ПЗ)	64
■ Количество принимаемых частотных сигналов (одним устройством УНО-УСБ-А3/ПЗ)	64
■ Быстродействие аварийной защиты по технологическим параметрам (без учета быстродействия блоков детектирования)	Не более 20 мс
■ Количество принимаемых дискретных сигналов (одним устройством УНО-УСБ-А3/ПЗ)	120
■ Задержка на формирования логических сигналов	Не более 1 мс
■ Вероятность несрабатывания управляющего сигнала аварийной защиты на требование останова реактора	5×10^{-7}
■ Вероятность ложного срабатывания управляющего сигнала аварийной защиты	1×10^{-6}
■ Дискретность архивации параметров	0,01 ÷ 1 с
■ Время хранения архивируемой информации	30 дней
■ Диапазон рабочей температуры окружающей среды блоков детектирования	+1 ÷ +85 °С +1 ÷ +120 °С (в течении 2 ч)
■ Диапазон рабочей температуры окружающей среды устройств и блоков	+1 ÷ +50 °С
■ Максимальная рабочая температура внутри шкафа	+75 °С
■ Температура транспортирования	-20 ÷ +50 °С
■ Сейсмические воздействия по МКС-64	9 баллов, 24 метра
■ Электромагнитная защищенность, в том числе прерывания напряжения питания	2 класс по ОПБ: группа-4, критерий качества-А 3 класс по ОПБ: группа-3, критерий качества-А не менее 500 мс
■ общее количество стоек (шкафов)	25 шт
■ Напряжение питания комплекса	160 ÷ 280 В 50 или 60 Гц

Таким образом, ССА предлагает для оснащения реакторных установок с ВВЭР два новых типа комплексов аппаратуры СУЗ. Один комплекс выполнен с применением конфигурируемой техники равнозначной по своей работе “жесткой логике” и не содержащей встроенных процессоров и процессорных блоков. Второй комплекс выполнен на программных средствах полностью разработанных в ССА и уже имеющих референтность применения в системе управления аварийной защитой на ряде исследовательских реакторов.

Проводя разнообразную и перспективную техническую политику при разработках СУЗ РУ, ССА предлагает наиболее полное решение принципа разнообразия, построив систему на двух комплектах, выполненных с применением различных технических решений.

Авторы благодарят сотрудников ССА, участвующих в разработке аппаратуры комплексов СУЗ и проведении пусконаладочных работ на АЭС Тяньвань, Калининской АЭС, исследовательских реакторах МИР.М1, ВВР-Ц. Авторы выражают признательность сотруднику РНЦ КИ Камышану А.Н. за любезно предоставленные материалы и оказанные консультации.

- [1] Taiwan NPP, Requirements Specification, Detail stages 1-3 of process engineering task description for the safety instrumentation and control systems, Concept Report (valid version).
- [2] SPIN-RPS// Реконструкция исследовательского реактора IRT-2000. Технический проект. Система контроля и управления. Пояснительная записка. №31-00240/00А. 2003.
- [3] Гусаров А.М., Жернов В.С., Любецкий К.И. Аппаратура системы управления и защиты реакторных установок, разделы 2, 3, 4 в книге Как создавалось отечественное ядерное приборостроение. Москва 2002г., Техника молодежи, с. 125-178.
- [4] Боровик Г.Ф. и др. Комплекс аппаратуры контроля нейтронного потока системы управления и защиты водо-водяных реакторов АЭС. Атомная энергия т.54, вып.1, январь 1983г.
- [5] Камышан А.Н., Алпатов А.М., Гусаров А.М., Лужнов А.М., Соколов И.В., Стефаницкая Л.О. Внереакторная система контроля энергораспределения и параметров в системе управления и защиты реакторов типа ВВЭР. Ядерные измерительно-информационные технологии, № 1, 2004.
- [6] <http://www.altera.com>
- [7] Мирошник Ю.М., Овчинников В.Н., Пелеганчук Ю.И., Пронякин А.В., Семичастнов В.О., Фельдман М.Е., Шермаков В.Е. Управляющая система безопасности АЭС. Ядерные измерительно-информационные технологии, № 1, 2004.
- [8] Гусаров А.М., Грецкий Л.Ю., Жернов В.С., Камышан А.Н., Коноплев Н.П., Мирошник Ю.М., Пронякин А.В., Соколов И.В., Якушев А.Г. Система управления защитными действиями реакторов типа ВВЭР. Ядерные измерительно-информационные технологии, № 1, 2004.
- [9] Заикин А.А. Современный интегрированный комплекс аппаратуры системы управления и защиты исследовательских реакторов, Автоматизация в промышленности, №9, 2004, с. 3-8.
- [10] Гусаров А.М., Заикин А.А. Основные принципы построения комплекса аппаратуры системы управления и защиты исследовательских реакторов. Труды Международного симпозиума "Измерения важные для безопасности в реакторах", четвертое издание, Москва, ноябрь 2004.
- [11] Сирота А.А. Программно-технический комплекс аварийной и предупредительной защиты атомных реакторов. Труды Международного симпозиума "Измерения важные для безопасности в реакторах", четвертое издание, Москва, ноябрь 2003.
- [12] Набатов А.С., Елисеев В.В., Пивоваров Г.Ю. Аппаратура контроля нейтронного потока для реакторов типа ВВЭР-1000. Труды Международного симпозиума "Измерения важные для безопасности в реакторах", четвертое издание, Москва, ноябрь 2004.
- [13] Кобышев Н.В., Грецкий Л.Ю., Гусаров А.М., Камышан А.Н., Крупкина Л.И., Лужнов А.М., Пушкин В.В., Соколов И.В., Стефаницкая Л.О., Комплекс аппаратуры системы управления и защиты по нейтронно-физическим параметрам, Ядерные измерительно-информационные технологии. №1. 2004.

Жернов Виталий Степанович, к.т.н., научный руководитель ССА,
Заикин Алексей Анатольевич, к.т.н., начальник лаборатории ССА,
Мирошник Юрий Михайлович, начальник лаборатории ССА,
Пронякин Андрей Владимирович, генеральный директор ССА,
Соколов Игорь Викторович, директор по новым технологиям ССА.

123182, Москва, площадь Курчатова дом 1.
Tel: +7(095) 196-77-11, +7(095) 196-92-50
Fax: +7(095) 196-72-51
E-mail: System.Atom@ru.net