

*Канд. техн. наук Ю.Н. Ольшевский,
канд. техн. наук Г.А. Жемчугов,
канд. физ.-мат. наук А.О. Мирошник, инж. Т.Н. Галкина*

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И ЗАЩИТЫ ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕАКТОРОВ ТИПА ВВЭР-1000

В настоящее время в России, странах СНГ и ряде стран дальнего зарубежья находятся в эксплуатации более 50 атомных энергоблоков с реакторами ВВЭР российского производства, оснащенных системами управления и защиты (СУЗ) разработки НПП ВНИИЭМ. Наибольшую долю в атомной энергетике составляют АЭС с вододояными реакторами (ВВЭР) и дальнейшее развитие атомной энергетики будет базироваться на реакторах ВВЭР большой мощности 1000-2200 МВт.

Комплекс электрооборудования СУЗ реакторов ВВЭР структурно состоит из двух основных систем - системы управления распределенными электроприводами органов регулирования реактора (ОР) и интегрированной системы аварийной защиты (АЗ).

Система управления приводами ОР разработки НПП ВНИИЭМ построена с широким применением РС-совместимых и специализированных микроконтроллеров класса 3Н по нормам Госатомнадзора и обеспечивает управление, диагностику, регистрацию и представление оператору необходимой информации.

Система аварийной защиты в России до настоящего времени строится на непрограммируемых средствах, так как эта система должна сертифицироваться по более высокому классу безопасности - 2У. В Европейских странах, например во Франции, на АЭС с реакторами ВВЭР большой мощности, системы аварийной защиты оснащены цифровыми вычислительными средствами, позволяющими существенно сократить проводные связи между отдельными подсистемами АЗ и, тем самым, значительно повысить надежность систем аварийной защиты и, следовательно, повысить безопасность АЭС.

Традиционно аварийная защита строится с выполнением следующих основных принципов:

- принцип "единичного отказа" требует выполнения системой своих функций при любом единичном отказе в системе;
- принцип "отказа по общей причине" требует создания структуры, исключаящей общие фрагменты системы, отказ которых может привести к полному отказу всей системы.

На основании второго принципа в России традиционно аварийная защита состоит из двух независимых комплектов АЗ, расположенных в разных помещениях и воздействующих на органы регулирования реактора по логике "ИЛИ".

Выпускаемые в настоящее время средства вычислительной техники отечественного и импортного производства позволяют уже сегодня создавать системы аварийной защиты на базе микроконтроллеров, интегрированных с помощью интерфейсных связей и сетевых структур. При этом отдельные подсистемы предлагаемого комплекса аварийной защиты уже опробованы на промышленных объектах, включая АЭС.

Иерархически каждый комплект АЗ состоит из двух каскадно-сопряженных частей с мажорированием аварийных сигналов.

На верхнем уровне работает иницирующая часть АЗ, обеспечивающая сбор информации о состоянии объекта.

На нижнем уровне происходит усиление сигналов верхнего уровня для формирования силовых воздействий аварийной защиты на органы регулирования реактора.

Иницирующая часть комплекта АЗ строится по трехканальной схеме, структура каждого канала (шкафа КНТП) показана на рис.1.

Шкаф КНТП (контроля нейтронных и теплотехнических параметров) включает в себя:

- микроконтроллер канала нейтронного потока (КНП);
- микроконтроллер теплотехнических параметров (КТП);
- микроконтроллер информационной связи (МКИ).

Микроконтроллеры КНП и КТП - специализированные контроллеры разработки НПП ВНИИЭМ, аттестованные для использования в Атомной энергетике и имеющие необходимое количество гальванически изолированных входов-выходов для аналоговых и цифровых сигналов.

В силу того, что КНП и КТП образуют ядро канала аварийной защиты и относятся к классу безопасности 2У, их программное обеспечение должно быть максимально прозрачным и функционировать без использования операционной системы и минимальном использовании прерываний.

Требования к разработке подобного программного обеспечения и обеспечению его надежности изложены в МЭК-880.

Для повышения надежности функционирования, контроллеры КНП и КТП должны быть конструктивно разделены, и иметь двух-фидерное отказоустойчивое питание.

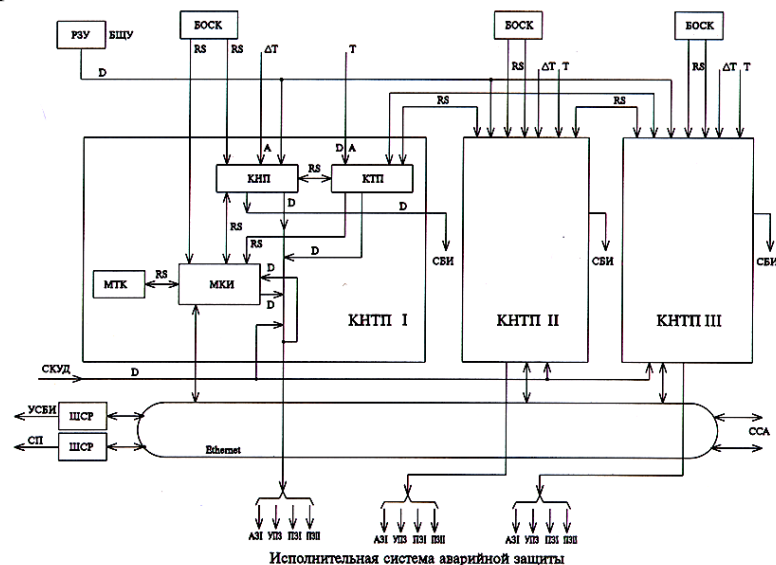


Рис.1. Структура инициирующей части аварийной защиты:
RS - последовательный интерфейс; **D** - дискретный сигнал;
A - аналоговый сигнал

Микроконтроллер МКИ является промышленным PC - совместимым контроллером из серии B10P (разработки НПП ВНИИЭМ) и по уровню безопасности и надежности относится к классу 3Н. Конструкция микроконтроллера позволяет использовать в его составе широкий набор процессорных и периферийных модулей как отечественного (разработки НПП ВНИИЭМ), так и импортного производства.

Контроллер МКИ осуществляет связи с сетью Ethernet и обеспечивает поддержку местного табло контроля шкафа.

Так как требования к программному обеспечению устройств класса 3Н являются существенно более мягкими, то программное обеспечение контроллера МКИ может использовать одну из стандартных операционных систем и прерывания для обслуживания периферийных устройств.

Требования МЭК-880 для ПО МКИ носят рекомендательный характер.

При обмене информацией с контроллерами КНП и КТП по последовательному интерфейсу в штатном режиме эксплуатации, контроллер МКИ всегда выступает ведомым устройством.

Микроконтроллер КНП предназначен для контроля и формирования аварийных команд по уровню нейтронного потока и периоду разгона реактора.

Информация об уровне нейтронного потока может поступать в него в цифровом виде по интерфейсу RS485 от блока обработки сигналов ионизационных камер (БОСК) разработки НПП "Элегия" либо в аналоговом виде от серийно выпускаемой ЗАО "СНИИП-СИСТЕМАТОМ" аппаратуры контроля нейтронного потока (АКНП).

К настоящему времени аппаратура измерения нейтронного потока разработки НПП "Элегия", осуществляющая измерение нейтронного потока в многодекадном диапазоне от 10^{-3} до 10^9 н/см²·с от шести ионизационных камер, расположенных по высоте активной зоны реактора в бетонной защите, прошла опробование на 2-м блоке Калининской АЭС.

Для корректировки среднего сигнала нейтронного потока от шести детекторов с целью приведения его в соответствие с тепловой мощностью в контроллер КНП вводятся аналоговые сигналы ΔT от термопар по подогреву теплоносителя в каждой из четырех петель первого контура.

Микроконтроллер КТП принимает аналоговые (порядка 30) и дискретные (порядка 15) сигналы от теплотехнических датчиков (Т), по которым (в отдельности и в комплексе) формируются аварийные команды.

Информация из микроконтроллеров КНП и КТП по последовательному интерфейсу RS232 передается в микроконтроллер МКИ и далее в сеть Ethernet.

Дискретные аварийные команды микроконтроллеров КНП и КТП по логике "ИЛИ" передаются в исполнительную систему аварийной защиты АЗ.

Между микроконтроллерами КНП и КТП реализуется внутренняя связь через интерфейс RS232, по которому передаются номера уставок нейтронного потока, соответствующие уровням мощности, записанным в постоянной памяти контроллера КНП. Уровни уставок определяются состоянием и конфигурацией основного оборудования (например числом работающих петель первого контура).

Для достоверной идентификации состояния объекта по теплотехническим характеристикам микроконтроллеры КТП обмениваются со смежными каналами по интерфейсу RS485 сообщениями о переходе измеряемых параметров за пределы заданных уставок для дальнейшего учета их при формировании аварийных команд.

Микроконтроллеры КНП и КТП формируют четыре типа аварийных команд, реализующие четыре рода защит:

- АЗ1 - аварийная защита, вызывающая сброс всех ОР в активную зону реактора с целью прекращения цепной реакции размножения нейтронов;

- УПЗ - ускоренная предупредительная защита, вызывающая сброс группы ОР в активную зону;

- ПЗ1- предупредительная защита первого рода, вызывающая движение групп ОР вводимых в активную зону с рабочей скоростью;

- ПЗ2 - предупредительная защита второго рода, запрещающая движение ОР вверх на увеличение мощности реактора.

Защита первого рода АЗ1 является основной и все оборудование, связанное с реализацией этой защиты относится к классу 2У.

Все остальные виды предупредительной защиты относятся к классу 3Н.

Контроллер КНП имеет дискретную связь с ручным задатчиком уставок (РЗУ) защиты ПЗ1 по нейтронному потоку, с которого помимо уставок, "защитных" в памяти КНП, можно ограничивать мощность на уровне 3, 5, 10, 20 % от текущего значения.

В контроллере КНП имеется дискретный выход в иницилирующую систему безопасности СБИ.

Микроконтроллер МКИ по последовательному интерфейсу связан с БОСК, КНП, КТП и местным табло контроля (МТК), с помощью клавиатуры которого можно вызывать на экран любой параметр.

В контроллере МКИ выполняется диагностика всех устройств шкафа КНТП, производятся вычисления реактивности и определение аксиальной и азимутальной (через связи между каналами) неравномерности распределения нейтронного потока в активной зоне реактора, формируются сигналы предупредительной защиты. Через контроллер МКИ осуществляется связь со СКУД (система, обеспечивающая внутриреакторный контроль) и выход на сеть Ethernet для обмена информацией со шкафами серверов ШСР системы СУЗ.

От системы СКУД принимаются также прямые дискретные сигналы на срабатывание предупредительной защиты.

Через МКИ по разрешению руководителя оперативного персонала осуществляется доступ в контроллер КНТ для введения коэффициента пропорциональности K между подогревом теплоносителя ΔT и тепловой мощностью реактора Q , которые связаны равенством:

$$Q = K\Delta T.$$

Коэффициент K определяется расходом теплоносителя через реактор для различных конфигураций первого контура (работают все

петли, отключена одна петля, отключены две петли смежные или противоположные).

Расчетным путем расход может быть определен с погрешностью не менее 5%, а для корректировки сигнала нейтронного потока требуется более высокая точность, так как этот сигнал сравнивается с аварийными уставками. Поэтому коэффициент K должен определяться экспериментально на действующем реакторе в период первого освоения мощности.

Получив реальную тепловую мощность Q из системы СКУД или определив ее по другим измерениям и введя ее в контроллер МКИ, можно на основании реально измеренного подогрева ΔT , вычислить коэффициент K , исключив при этом все стационарные погрешности.

Введя коэффициент K во Flash память контроллера КНП, можно рассчитать текущую тепловую мощность Q , по которой далее производится автоматическая корректировка (определение коэффициента усиления) для измеряемого среднего значения нейтронного потока при квазистационарном состоянии реактора.

На структурной схеме показаны интерфейсные связи (RS485) между каналами (шкафами), построенные по принципу "из точки в точку", по которым передаются номера параметров вышедших за пределы уставок для формирования в каждом канале (контроллере КТП) аварийных команд по логике "свой с любым смежным".

Каждый из каналов КНТП (I, II, III) подает в исполнительную часть системы аварийной защиты по 4 дискретных команды, соответствующие четырем видам аварийной защиты, как указано выше.

Интегрирование комплекта иницилирующей части АЗ осуществляется с помощью кольцевого сегмента оптоволоконной сети Ethernet, по которой циркулируют все необходимые команды и данные для всех потребителей информации:

- информация от трех шкафов КНТП о срабатывании АЗ, состоянии аппаратуры и данные для расчетов общих параметров;
- информация для шкафов серверов ШСР верхнеблочного уровня СВБУ энергоблока, а также информация о первопричине срабатывания (СП) всех видов защит, о режимах работы регулятора мощности АРМ и смежных систем и аппаратуры (ССА);
- информация о текущих значениях нейтронного потока и давления пара, во втором контуре для регулятора АРМ;
- информация, необходимая для обмена с системой СКУД.

Дискретные аварийные команды трех каналов КНТП, сгруппированные по видам защит и подаваемые в аппаратуру мажоритарной обработки, функционирующую по логике "2 из 3-х" (рис.2), образуют два канала с выходными командами А и В, которые обес-

точиваются при возникновении аварийных ситуаций. Каналы строятся на последовательно соединенных однотипных оптоэлектронных модулях "2/3" и имеют тестовые входы Т, на которые могут по отдельности подаваться тестовые сигналы для проверки функционирования модулей и линий связи во время работы реактора. Тестовые сигналы осуществляют шунтирование входов, без разрыва рабочих цепей.

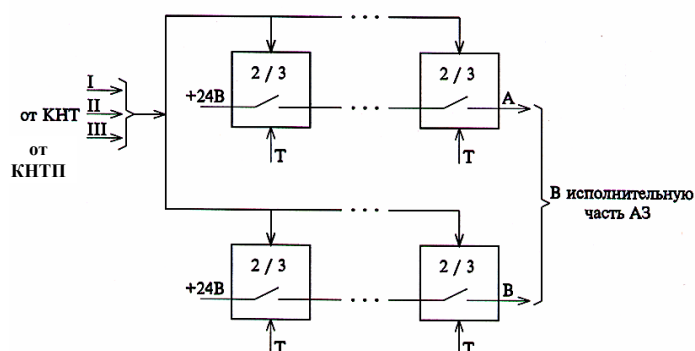


Рис. 2. Структура мажоритарной обработки сигналов аварийной защиты

Количество последовательно соединенных блоков устанавливается: 4 - для АЗ1; 2 - для всех видов ПЗ.

После мажоритарной обработки команды АЗ поступают в исполнительные шкафы, соединяющие воздействия двух комплектов АЗ.

Для формирования предупредительных защит используются однотипные блоки (по два для всех видов защит), содержащие два реле Р1 и Р2.

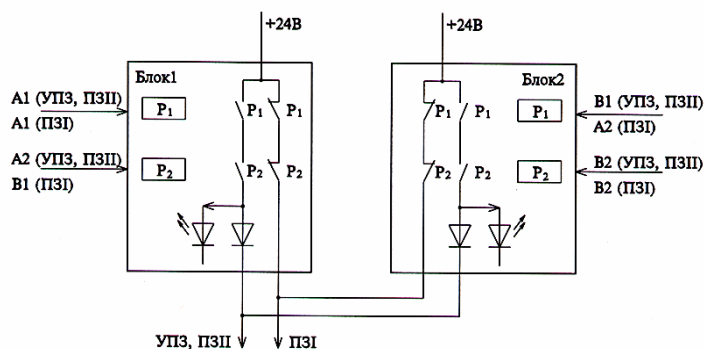


Рис. 3. Структурная схема подключения блоков предварительной защиты

Структура соединения блоков показана на рис.3, где цифрой 1 обозначены сигналы первого комплекта АЗ (А1, В1), цифрой 2 обозначены сигналы второго комплекта (А2, В2).

Команда ПЗ1 формируется замкнутыми контактами реле, так как эта команда должна вызывать движение рабочей группы ОР путем подачи напряжения.

Оконечная силовая часть аварийной защиты АЗ1 (рис.4) осуществляет прерывание силового питания электроприводов ОР.

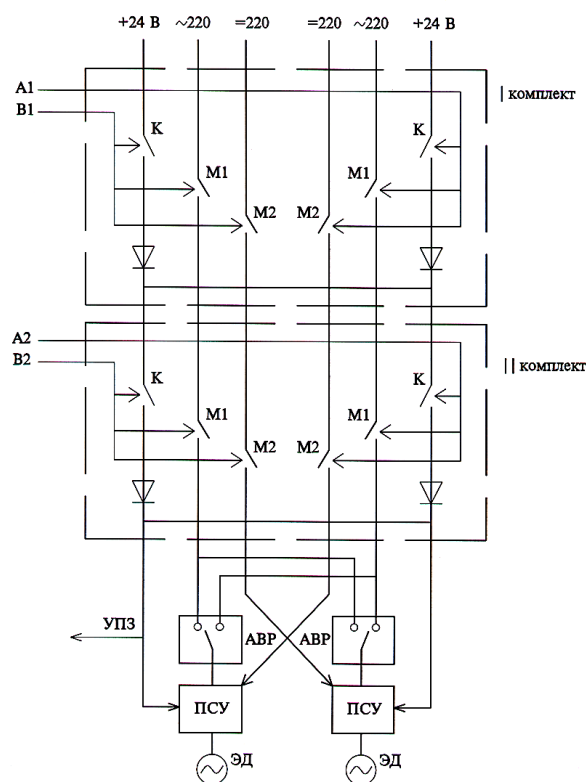


Рис. 4. Структурная схема силовой части АЗ1

Унифицированные приводы ОР состоят из шагового электромагнитного двигателя (ЭД) типа ШЭМ-3, разработки ОКБ "Гидропресс" и тиристорного устройства силового управления электродвигателями (ПСУ - панель силового управления).

Устройства ПСУ питаются от силовой сети переменного тока 220 В и сети постоянного тока ≈ 220 В для удержания ОР в подвешенном состоянии в случае кратковременного исчезновения переменного напряжения.

В ПСУ заводится сигнал разрешения (≈ 24 В) на "поджиг" тиристоров, снятие которого приводит к обесточиванию двигателей и снятию "подхвата" от постоянного напряжения.

На структурной схеме показаны все источники питания с разрывными контактами в каждом комплекте АЗ1:

- М1 - контакты отключения переменного тока;
- М2 - контакты отключения постоянного тока;
- К - контакты (оптронные) снятия команды "разрешения", идущие на определенную группу ОР при срабатывании УПЗ.

Все контакты разрываются при поступлении из аппаратуры мажорирования (см. рис. 2) каждого комплекта аварийных команд А и В.

Схемотехнически контакты К, управляются таким образом (снимая/подавая "разрешение" в ПСУ), что разрыв и замыкание основных контактов контакторов М1 и М2 происходит при отсутствии в их цепи тока.

Токопроводы переменного тока проходят через аппаратуру автоматического включения резерва АВР на случай исчезновения питания переменного тока от одного из вводов.

Весь комплекс аппаратуры исполнительной части аварийной защиты (см. рис.2 - 4) допускает проведение периодической автоматизированной проверки (тестирования) всех каналов защит, во время работы реактора путем поочередного задания тестов Т в мажоритарные модули (см. рис.2).

Для выполнения этой функции в помещении каждого комплекта защиты должен быть установлен шкаф тестирования с двумя микроконтроллерами, один из которых обеспечивает передачу тестов Т с приемом сигналов "отклика" из схем рис.3 и 4, а второй резервный контроллер (на случай неисправности первого) с ручным переключением должен работать в телеметрическом режиме.

Контроллеры этого шкафа обеспечивают диагностику ложного срабатывания любого канала защит и передачу информации о состоянии каналов в сеть Ethernet и далее через серверы системы СУЗ на БЩУ и другие системы АЭС.

Применение микроконтроллеров и цифровых связей в системе аварийной защиты позволяет существенно сократить объем оборудования и проводниковые связи в системе, что значительно повышает ее надежность и, следовательно, безопасность АЭС.