

Биряк В.В.

Одесский национальный политехнический университет

НАЗНАЧЕНИЕ ОБОРУДОВАНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И ЗАЩИТЫ. РЕЖИМЫ РАБОТЫ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СИСТЕМ СУЗ. МОДЕЛЬ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕГУЛИРУЮЩЕЙ ГРУППЫ ОГАНОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ СУЗ НА ЗАЭС

Одна из важнейших задач при эксплуатации ядерного реактора – обеспечение ядерной безопасности и управление режимами его работы. Ядерный реактор управляется главным образом с помощью системы управления и защиты (СУЗ), поэтому пуск и работа реактора без системы запрещается. Объектом рассмотрения является оборудование систем управления и защиты, режимы работы таких их функциональных систем: режимы функционирования системы группового и индивидуального управления (СГИУ), электропитание (ЭП) СУЗ; режимы функционирования системы аппаратуры контроля нейтронного потока (АКНП); режимы функционирования системы программно-технического комплекса аварийной защиты – предупредительной защиты (ПТК АЗ-ПЗ). Также представлена модель эффективности регулирующей группы органов регулирования (ОР) СУЗ на примере 5 блока Запорожской АЭС.

Ключевые слова: система управления и защиты, программно-технический комплекс, аварийная защита, предупредительная защита, система группового и индивидуального управления, аппаратура контроля нейтронного потока, АЭС.

Постановка проблемы. Энергетические реакторы предназначены для получения тепла, используемого в дальнейшем для его преобразования в электрическую энергию. Как объект управления, ядерный реактор (ЯР) обладает существенными особенностями по сравнению с другими объектами энергоблока.

Первая особенность обусловлена его нейтронно-физическими свойствами. Это качественная и количественная зависимость динамики поведения реактора от исходной мощности и величины вносимой реактивности, скорости изменения плотности нейтронов. Вторая особенность – изменение мощности подкритического реактора по экспоненциальному закону. Третья особенность – это зависимость коэффициента усиления ядерного реактора от уровня мощности. Для устойчивой работы системы автоматического регулирования необходимо, чтобы коэффициент усиления всей системы (реактор плюс регулятор) в диапазоне регулирования мощности ЯР был постоянным. Четвертая особенность – наличие внутренних обратных связей, обусловленных температурной зависимостью реактивности и отравлением ядерного реактора продуктами деления. Пятая особенность – это необходимость компенсации большого запаса реактивности с помощью выгорающего поглотителя. Шестая особенность – это многорежимность функционирования ядерного реактора. Седьмая особенность – потенци-

альная возможность выделения огромной энергии за чрезвычайно малые промежутки времени. Восьмая особенность – наличие значительной радиоактивности в местах расположения различных элементов систем контроля, регулирования и защиты, что затрудняет эксплуатацию и ремонт оборудования. Длительная работа, например, датчиков (детекторов) этих систем при высоких уровнях излучения может привести к ухудшению характеристик датчиков и изменению электрического сигнала.

Постановка задания. Эти особенности ядерного реактора учитываются при разработке систем управления и защиты. Одна из важнейших задач при эксплуатации ядерного реактора – обеспечение ядерной безопасности и управление режимами его работы. Ядерный реактор управляется главным образом с помощью системы управления и защиты (СУЗ).

Изложение основного материала.

Назначение оборудования СУЗ

Системой управления и защиты ядерного реактора называется многофункциональная подсистема автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУТП) блока, предназначенная для контроля мощности реактора, управления и быстрого гашения цепной реакции во всех режимах его работы, а также поддержания реактора в подкритическом состоянии. Пуск и работа реактора без системы СУЗ запрещаются.

Основным требованием, предъявляемым к СУЗ, является обеспечение безопасности работы АЭС. Для обеспечения этого требования все устройства СУЗ должны обладать высокой надежностью. Кроме того, СУЗ должна обладать высокой живучестью, т.е. обеспечивать выполнение наиболее ответственных функций (гашение цепной реакции) даже при наиболее тяжелых авариях на блоке (полное обесточивание станции, пожары в помещениях блочного щита управления (БЩУ) и кабельных трассах).

При более подробном рассмотрении назначения оборудования СУЗ можно указать, что система управления и защиты реактора предназначена: для автоматического регулирования мощности ЯР в соответствии с мощностью, отдаваемой турбогенераторами в сеть, или стабилизации мощности ЯР на заданном уровне; для пуска ядерного реактора (ЯР) и вывода его на мощность в ручном режиме; для компенсации изменения реактивности в ручном и автоматическом режимах; для аварийной защиты ЯР (прекращения или замедления цепной реакции в активной зоне ядерного реактора); для сигнализации о причинах срабатывания аварийной защиты; для автоматического шунтирования некоторых сигналов аварийной защиты; для сигнализации о неисправностях, возникающих в СУЗ; для индикации положения органов регулирования (ОР) ЯР на БЩУ и резервном щите управления (РЩУ), а также выдачи информации о положении каждого ОР в систему внутриреакторного контроля (СВРК) и управляющую вычислительную систему (УВС) энергоблока.

Система управления и защиты ядерного реактора обеспечивает функции управления и аварийной защиты.

Функции управления заключаются: в пуске реактора с периодом не менее допустимого; в изменении мощности реактора при пуске, остановке, переходе с одного режима на другой; в поддержании требуемой мощности реактора; в автоматическом или ручном регулировании распределения энерговыделения по активной зоне реактора; в регулировании ядерной энергетической установки в режимах нормальной эксплуатации; в ограничении мощности реактора в зависимости от состава основного оборудования, находящегося в работе; в автоматическом или ручном снижении мощности при изменении условий эксплуатации реактора.

Функция защиты заключается в быстром автоматическом и надежном гашении цепной реакции в следующих случаях: при достижении аварийной

уставки по нейтронной мощности; при достижении аварийной уставки по скорости нарастания мощности (или реактивности); при достижении аварийной уставки по технологическому параметру, требующего останова реактора; при исчезновении напряжения на шинах электропитания СУЗ; при появлении аварийных технологических сигналов, требующих останова реактора; при нажатии кнопок АЗ; при неисправности или нерабочем состоянии любых двух из трех каналов защиты по уровню или скорости нарастания мощности.

Аварийная защита должна обладать приоритетом перед другими видами управления.

СУЗ должна обеспечить ручное дистанционное управление любым исполнительным механизмом (ИМ) или группой ИМ.

Режимы работы функциональных систем СУЗ. Режимы функционирования системы АКНП

Режим выхода реакторной установки (РУ) на минимальный контролируемый уровень (МКУ). В этом режиме все блоки детектирования находятся на уровне центра активной зоны, контроль уровня нейтронного потока ведется по сигнально-измерительным каналам, работающим в диапазоне источника. Информация об уровне нейтронного потока в виде гистограммы представлена по всем каналам одновременно на экране дисплея оператора. Ведется контроль мощности по звуковым индикаторам разгона на БЩУ и стрелочным приборам на резервном щите управления (РЩУ). Для АКНП-3 положение блоков детектирования контролируется по сигнальным лампам и показаниям сельсинов на БЩУ и РЩУ.

В режиме дальнейшего подъема мощности РУ, по мере роста мощности, происходит смена диапазонов измерения. Оператор, с помощью переключателей уставок, имеет возможность задавать уставки срабатывания АЗ по мощности РУ, увеличивая их по мере подъема мощности.

Для АКНП-3 по сигналу «начало диапазона» (НД) происходит автоматический вывод блока детектирования (БД) от центра активной зоны в крайнее нижнее положение. Исключение составляет комплект оборудования для РЩУ. Там вывод БД осуществляется по сигналу конца диапазона источника. Такие переходы осуществляются, для основных комплектов, при переходе из диапазона источника (ДИ) в диапазон промежуточный (ДП) и из ДП в диапазон энергетический (ДЭ).

Для АКНП-И, АКНП-ИФ используются БД, которые постоянно находятся в зоне максимального нейтронного потока во всех режимах реакторной установки. Весь диапазон контролируемой

мощности условно разбит на два поддиапазона – пусковой и рабочий. Кроме того, рабочий диапазон разбит еще на два поддиапазона – логарифмический (ДР1) и линейный (ДР2).

Режим работы энергоблока в диапазоне энергетическом (АКНП-3), ДР (ПТК АКНП-И, ПТК АКНП-ИФ) измерения мощности.

В этом режиме оборудование АКНП, кроме сигналов, предназначенных для ввода в действие АЗ, ПЗ и текущего значения мощности РУ, выдает в систему АЗ сигнал о превышении мощности 5% $N_{ном}$ и 75% $N_{ном}$ для ввода или вывода отдельных защит РУ. В систему ускоренной предупредительной защиты (УПЗ) такой сигнал поступает при достижении мощности 75% $N_{ном}$ для ввода УПЗ в работу.

Режим работы оборудования системы контроля положения (СКП)-АКНП

В этом режиме для АКНП-3 предварительно производится установка измерительных камер в шахту реактора. Технологические операции по перегрузке топлива производятся только при разрешающем сигнале на табло устройство визуальное (УВИЗ-06). Для АКНП-И, АКНП-ИФ в этом режиме контроль реактора при загрузке (перегрузке) топлива осуществляется БД (каналами) СКП. Информация при перегрузке (загрузке) топлива выводится на оптико-акустические сигнализаторы и устройства отображения, расположенные на пульте перегрузочной машины и на панелях БЩУ. Работа АКНП в режиме нормальной эксплуатации включает в себя работу двух комплектов АКНП. Критерием успеха системы АКНП при формировании сигналов АЗ является выдача управляющих команд аварийных защит двумя из трех каналов одного из комплектов АКНП. Сигнал по нейтронной мощности в каждый из каналов панели автоматического регулятора мощности (АРМ) и панели разгрузки и ограничения мощности (РОМ) формируется как сумма сигналов от двух устройств накопления и обработки информации (УНО) АКНП (по одному в каждом комплекте). Так как для успешной работы АРМ и РОМ достаточно исправности двух из трех каналов, критерием успеха системы при формировании сигналов по нейтронной мощности в схемы АРМ и РОМ является работа двух из трех пар измерительных каналов: 1УНО и 4УНО, 2УНО и 5УНО, 3УНО и 6УНО.

Режимы функционирования системы ПТК АЗ-ПЗ

Система ПТК АЗ-ПЗ эксплуатируется при нормальных условиях эксплуатации, при нарушениях нормальных условий эксплуатации и при авариях.

В нормальных условиях эксплуатации система ПТК АЗ-ПЗ эксплуатируется в режиме ожидания

при пуске, останове РУ и при работе на мощности. Система находится в состоянии готовности к выполнению своих функций в любой момент времени. Это обеспечивается следующими мерами: обеспечением бесперебойного энергоснабжения системы; положение органов регулирования в верхнем положении (кроме регулирующей группы); все необходимые элементы и устройства проверены и находятся в необходимом положении.

Регулирующее устройство АРМ-5С может работать в режимах: режим «Н» – режим астатического поддержания нейтронной мощности с зоной нечувствительности $\pm 2\%$ $N_{ном}$. Режим реализуется в канале регулятора реактора по нейтронной мощности (РН); режим «Т» – режим астатического поддержания давления во втором контуре с зоной нечувствительности $\pm 2\%$ $N_{ном}$. Режим реализуется в канале регулятора реактора по нейтронной мощности (РН); режим «Т» – режим астатического поддержания давления во втором контуре с зоной нечувствительности $\pm 0,5$ кгс/см². Режим реализуется в канале регулятор реактора по теплотехническому параметру (РТ); режим «С» – стерегущий режим поддержания давления во втором контуре с зоной нечувствительности $+1,0$ кгс/см². Режим реализуется в канале РРТ.

Регулирующее устройство ПТК АРМ-РОМ-УПЗ может работать в режимах: режим «Н» – режим астатического поддержания нейтронной мощности с зоной нечувствительности $\pm 1,5\%$ $N_{ном}$, от текущего значения; режим «Т» – режим астатического поддержания давления во втором контуре с зоной нечувствительности $\pm 0,5$ кгс/см²; режим «С» – стерегущий режим поддержания давления во втором контуре с зоной нечувствительности $+2,0$ кгс/см².

При нарушениях нормальных условий эксплуатации, когда инициируется аварийный сигнал для остановки реактора, все привода СУЗ теряют электропитание, что приводит к падению всех ОР СУЗ под действием собственного веса до крайнего нижнего положения. У оператора имеется возможность включить систему АЗ с БЩУ или с РЩУ.

При нарушениях нормальных условий эксплуатации, когда инициируется сигнал для срабатывания УПЗ, привода ОР СУЗ первой группы теряют электропитание и опускаются вниз под действием собственного веса до крайнего нижнего положения. Доразгрузка до необходимых уровней мощности РУ осуществляется устройством РОМ-2. У оператора имеется возможность включить систему УПЗ с БЩУ при любой мощности РУ.

Критерием успеха срабатывания АЗ, является формирование на выходе хотя бы одного кроссо-

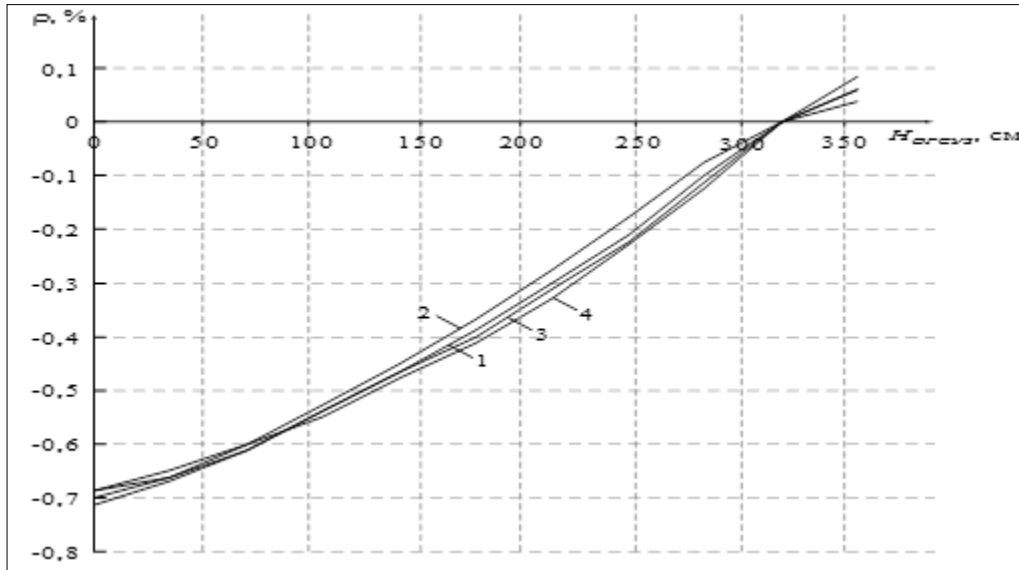


Рис. 2. Залежність реактивності регулюючої групою ОР СУЗ в залежності від висоти введення в різні кількості ефективних суток:
 1 – 0.00 ефективних суток; 2 – 80.00 ефективних суток;
 3 – 160.00 ефективних суток; 4 – 284.72 ефективних суток

При появленні сигналу УПЗ знімається живлення з приводів ОР СУЗ вибраної групою, вони падають вниз як при команді АЗ.

Робота системи електроживлення СУЗ в режимі нормальної експлуатації

Система знаходиться в роботі во всіх режимах експлуатації РУ і забезпечує живлення комплексу СУЗ постійним і змінним током від мереж силового і надійного живлення. При обесточуванні одного з видів живлення система перемикається на автоматичне включення резерва (АВР) на другий ввід, що є нормальним режимом роботи системи. Критерієм успіху системи СГІУ при спрацьовуванні АЗ є ввід ПС СУЗ в активну зону, що припиняє тим самим ланцюгову реакцію, переводячи РУ в підкритичне стан.

Структурна схема СУЗ

Структурні схеми управління і контролю в проектах автоматизації розробляють в відповідності з керівним технічним матеріалом АСУ ТП.

На структурній схемі відображаються в загальному вигляді основні рішення проекту по функціональній, організаційній і технічній структурах АСУ ТП. При цьому дотримуються ієрархія системи і зв'язи між пунктами контролю і управління, оперативним персоналом і технологічним об'єктом управління. Структурні схеми читають, як правило, знизу-вверх і зліва направо.

Структурна схема системи управління ОР і захисту реакторної установки показана на рисунку 1. На схемі відображені всі функціональні

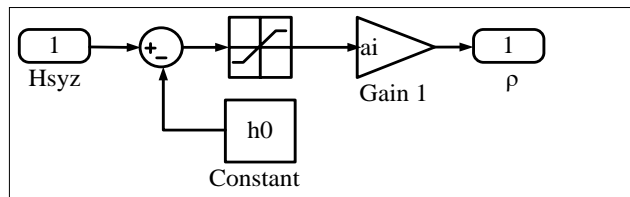


Рис. 3. Імітаційна модель ефективності регулюючої групою ОР СУЗ. Блок обмежувача в моделі дозволяє смоделивати зміну реактивності регулюючої групою ОР СУЗ, вносимої в i-у зону, в залежності від висоти занурення стержнів в АКЗ реактора

системи, що входять до складу СУЗ, їх назви і зв'язи між собою і об'єктом управління, а також пункт контролю і управління (БЦУ), тем самым показана зв'язь оперативного персоналу з технологічним об'єктом управління.

Модель ефективності регулюючої групою ОР СУЗ

Модель ефективності регулюючої групою ОР СУЗ була отримана експериментально для блоку № 5 Запорізької АЕС. Графік залежності реактивності від висоти підйому групою для різної ефективності суток кампанії реактора показаний на рисунку 2.

Розрахунок проводився для 284.72 ефективних суток. В аналітичній формі залежність реактивності від висоти занурення регулюючої групою ОР СУЗ краще апроксимується лінійною функцією. Максимальна реактивність, яку може внести регулююча група ОР СУЗ в одну зону:

$$\rho_{OP\text{ СУЗ}i} = a_i \cdot (h_{СУЗ} - h_0), \quad (1)$$

где $\rho_{OP\text{ СУЗ}i}$ – реактивность, вносимая регулирующей группой ОР СУЗ, в отн. ед.; a_i – коэффициент наклона характеристики, 1/см; $h_{СУЗ}$ – высота погружения регулирующей группы ОР СУЗ в АКЗ реактора, см; h_0 – начало i- и зоны снизу АКЗ, см.

В среде моделирования Simulink пакета Matlab эта зависимость была реализована следующим образом:

Выводы. Были рассмотрены оборудование систем управления защиты, режимы работы их функциональных систем, структурная схема СУЗ. Также представлена модель эффективности регулирующей группы ОР СУЗ на примере блока № 5 Запорожской АЭС.

Список литературы:

1. Технологический регламент безопасной эксплуатации энергоблока № 5 Запорожской АЭС.
2. Типовая программа подготовки на должность ведущего инженера управления реактором для АЭС с блоками ВВЭР-1000.
3. Типовая программа подготовки на должность ведущего инженера управления блоком для АЭС с блоками ВВЭР-1000.
4. Учебное пособие общего назначения по теме: «Система управления и защиты реакторной установки», 2017. 190 с.
5. Учебное пособие общего назначения по теме: «Структура ЦТАИ и структура АСУТП блока», 2017. 183 с.

ПРИЗНАЧЕННЯ ОБЛАДНАННЯ СУЗ. РЕЖИМИ РОБОТИ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ СИСТЕМ СУЗ. МОДЕЛЬ ЕФЕКТИВНОСТІ РЕГУЛЮЮЧОЇ ГРУПИ ОГАНІВ РЕГУЛЮВАННЯ СУЗ НА ЗАЕС

Одне з найважливіших завдань при експлуатації ядерного реактора – забезпечення ядерної безпеки та управління режимами його роботи. Ядерний реактор управляється головним чином за допомогою системи управління і захисту (СУЗ), тому пуск і робота реактора без системи забороняється. Об'єктом розгляду є обладнання систем управління захисту, режими роботи таких їх функціональних систем: режими функціонування системи групового та індивідуального управління (СГПУ), електроживлення (ЕП) СУЗ; режими функціонування системи апаратури контролю нейтронного потоку (АКНП); режими функціонування системи програмно-технічного комплексу аварійного захисту – попереджувального захисту (ПТК АЗ-ПЗ). Також представлена модель ефективності регулюючої групи органів регулювання (ОР) СУЗ на прикладі 5 блоку Запорізької АЕС.

Ключові слова: система управління і захисту, програмно-технічний комплекс, аварійний захист, попереджувальний захист, система групового та індивідуального управління, апаратура контролю нейтронного потоку, АЕС.

PURPOSE OF CPS EQUIPMENT. MODES OF OPERATION OF CPS FUNCTIONAL SYSTEMS. THE MODEL OF EFFICIENCY OF THE CPS REGULATORY GROUP AT ZAPORIZHIA NPP

One of the most important tasks in the operation of a nuclear reactor is to ensure nuclear safety and control its operating modes. The nuclear reactor is controlled mainly by the control and protection system (CPS), therefore, the launch and operation of the reactor without a system is prohibited. The object of consideration is the equipment of protection control systems, modes of operation of their functional systems, such as: modes of operation of the system of group and individual control (SGIC), power supply of the CPS; modes of operation of the system of neutron flux monitoring equipment; modes of operation of the software and technical complex of emergency protection - preventive protection. Also, a model of the effectiveness of the regulatory group of regulatory agencies of CPS is presented on the example of unit 5 of the Zaporizhia NPP.

Key words: control and protection system, software and hardware complex, emergency protection, preventive protection, group and individual control system, neutron flux monitoring equipment, NPP.