

Улицкая Е.О.

Одесский национальный политехнический университет

Широкова А.Н.

Одесский национальный политехнический университет

НАСТРОЙКИ РЕЛЕЙНОГО РЕГУЛЯТОРА НА ПРИМЕРЕ КОМПЕНСАТОРА ДАВЛЕНИЯ АЭС: ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ КД

Особенность процессов управления в системе компенсации давления АЭС с ВВЭР-1000 состоит в том, что некоторые из регуляторов воздействуют на одни и те же исполнительные механизмы, только в различных режимах работы. В стационарном состоянии мощность ТЭНов (трубчатый электронагреватель) компенсирует потери теплоты в окружающую среду. При понижении температуры теплоносителя часть этого теплоносителя переходит в первый контур. Пар в компенсаторе давления (КД) расширяется и давление его падает. Для его восстановления необходимо увеличить мощность ТЭНов. При увеличении мощности реактора процессы происходят в обратном направлении. При больших и быстрых повышениях давления используется впрыск воды с холодной нити циркуляционного контура. Если после открытия клапанов впрыска давление в компенсаторе продолжает расти, то пар сбрасывается в барботер. Если это не помогает, то в атмосферу. Таким образом, одной из регулируемых величин является давление теплоносителя. Проанализирован вопрос о создании имитационной модели КД с использованием релейного регулятора.

Ключевые слова: релейный регулятор, давление, АЭС, исполнительные механизмы, компенсатор давления, система управления.

Постановка проблемы. Компенсатор давления является важным объектом, работающим на поддержание давления в первом контуре при проектных нарушениях условий нормальной эксплуатации и проектных аварийных ситуациях. Повышение или снижение давления в первом контуре может привести к аварии на атомной электростанции, поэтому целью данной статьи является управление КД с помощью релейного регулятора.

Постановка задания. Целью статьи является создать имитационную модель компенсатора давления, показать обзор настройки релейного регулятора на примере компенсатора давления АЭС с дальнейшей настройкой релейных регуляторов, управляющих работой группы ТЭНов и группы клапанов впрыска воды.

Изложение основного материала исследования. Система компенсации давления необходима для реакторов, охлаждаемых водой под давлением, и предназначена для компенсации температурных изменений объема воды, заполняющей контур. Она используется также для создания давления при пуске, поддержания давления в эксплуатации и ограничения отклонений давления в аварийных режимах.

Система компенсации давления теплоносителя – автономная система ядерного реактора, подключае-

мая к контуру теплоносителя с целью выравнивания колебаний давления в контуре во время работы реактора, возникающих за счет теплового расширения.

Основным элементом системы является паровой компенсатор давления, состоящий из вертикального цилиндрического сосуда, нижняя часть которого заполнена водой и соединена с «горячей» ниткой главного циркуляционного трубопровода первого контура. Давление в компенсаторе создается паровой «подушкой» за счет кипения теплоносителя, нагреваемого электронагревателями, размещенными под свободным уровнем. В переходных режимах при колебаниях средней температуры теплоносителя, связанных с изменением нагрузки или нарушениями в работе оборудования реакторной установки, в первом контуре меняется давление. При этом часть теплоносителя перетекает в контур или из контура в компенсатор давления по соединительным трубопроводам.

В системе компенсации давления реализовано несколько технических решений, которые, последовательно вступая в работу, позволяют решить задачу поддержания давления теплоносителя в реакторном контуре в проектных пределах:

– изменение объема паровой части компенсатора давления при фазовых переходах (уменьшение объема при росте давления в реакторном

контуре и его увеличение при снижении этого давления);

- включение электронагревателей при некомпенсированном за счет фазового перехода снижении давления в реакторном контуре;

- включение впрыска в компенсатор давления воды из «холодного» трубопровода реакторного контура при некомпенсированном повышении давления в нем;

- сброс через предохранительные клапаны (три уровня по давлению) паровой фазы из компенсатора давления в барботер, где пар конденсируется при охлаждении объема барботера водой промежуточного контура и давление в баке-барботере снижается;

- при чрезмерном росте давления в баке-барботере открываются разрывные мембраны на корпусе бака, за счет чего давление снижается.

Единственным входным воздействием КД является средняя температура теплоносителя первого контура. Однако в реальной энергетической установке возмущающими воздействиями на давление являются изменение реактивности (ρ) реактора на турбину. Аналитический вывод уравнений динамики по указанным каналам довольно громоздок, поэтому в работе были использованы экспериментальные кривые разгона КД для энергоблока с ВВЭР-1000. Известно, что динамические свойства КД при возмущении реактивностью являются нелинейными.

Такие нелинейные свойства при структурном моделировании с помощью типовых звеньев можно приближенно описать с помощью инерционных звеньев первого порядка и звена чистого запаздывания, как показано на рис. 1.

В приведенных коэффициентах передачи давление выражено в МПа, реактивность – в относительных единицах. Использование данной экспериментальной математической модели позволило

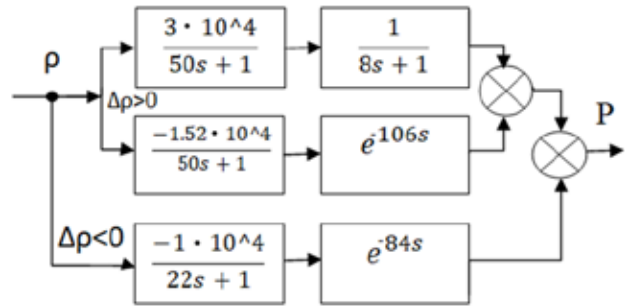


Рис. 1. Структурная схема модели КД по давлению по каналам реактивности [1]

получить кривые разгона по каналу давления при изменении реактивности (рис. 2).

В табл. 1 представлены номинальные значения параметров, при которых срабатывают датчики включения ТЭНов либо впрыска.

Таблица 1

Настройки включения регулирующего воздействия

Значение параметра, кгс/см ²	Регулирующее воздействие	Зона нечувствительности соотв. релейных элементов
164,0	Вкл. впрыск	0,5
160,0	Вкл. впрыск	0,2
159,9	Вкл. ТЭН	0,2
158,5	Вкл. ТЭН	2
157,0	Вкл. ТЭН	3
155,0	Вкл. ТЭН	5

Для последующего синтеза релейной АСР компенсатора давления была создана структурная схема имитационной модели, изображенной на рис. 3.

Системы с релейными регуляторами относятся к классу нелинейных АСР. Характерной особенностью АСР с релейными регуляторами является

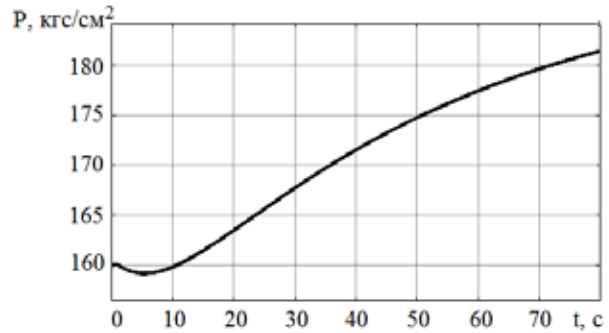
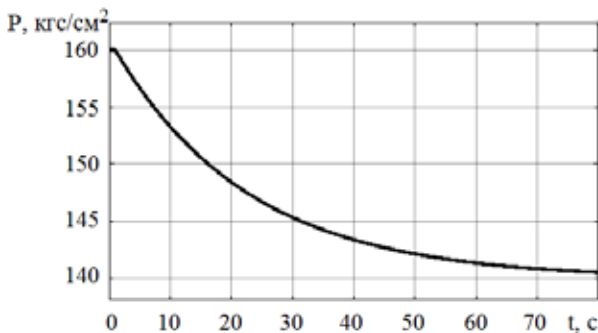


Рис. 2. Кривые разгона компенсатора давления при уменьшении (а) и увеличении (б) реактивности

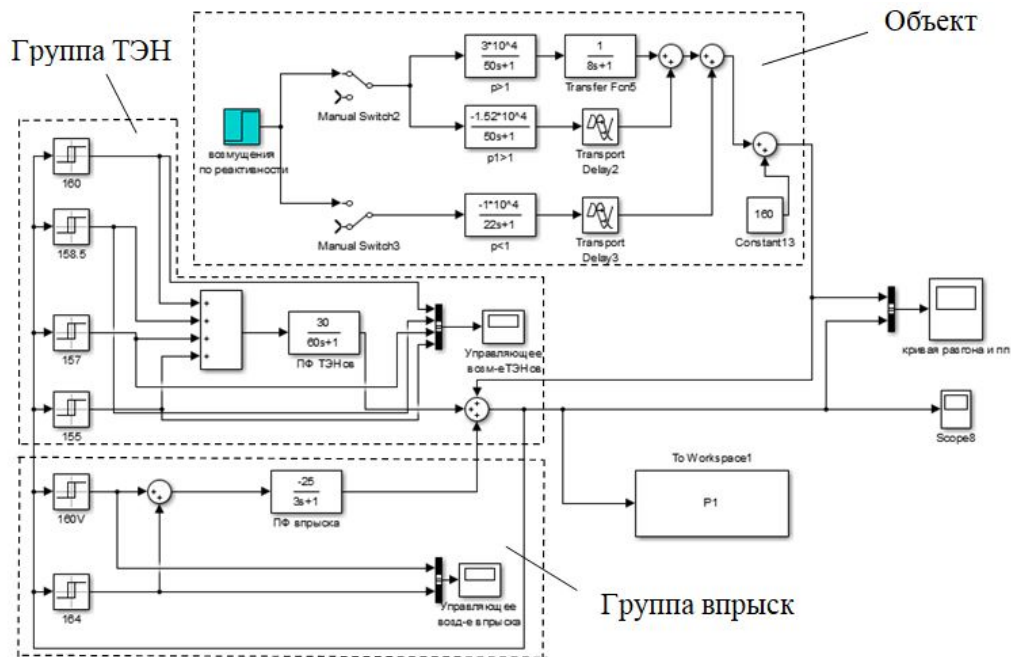


Рис. 3. Структурная схема имитационной модели

наличие автоколебаний. На рис. 4 изображены типовые графики автоколебаний и изменения регулирующего воздействия в релейной системе регулирования.

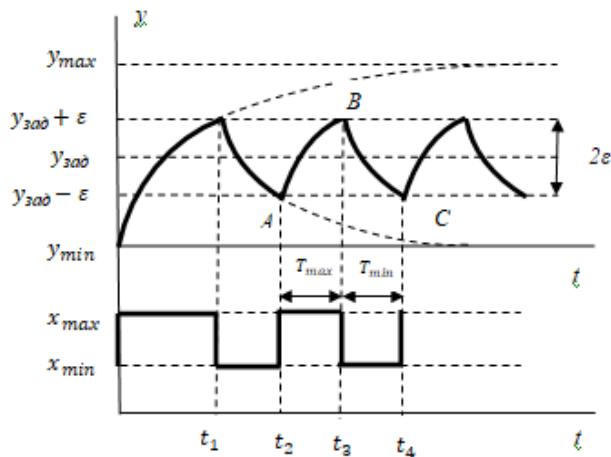


Рис. 4. Автоколебательный переходный процесс и изменение регулирующего воздействия

Здесь y_{max} и y_{min} – максимальное и минимальное установившееся значение регулируемой переменной, соответствующие максимальному x_{max} и минимальному x_{min} значениям регулирующего воздействия и связанные с ним через коэффициент передачи объекта регулирования:

$$\begin{aligned} y_{max} &= Kx_{max} \\ y_{min} &= Kx_{min} \end{aligned}$$

Наличие запаздывания в передаточной функции объекта приводит к отставанию регулируемой переменной на величину τ (штриховая и сплошная линии на рис. 5). Вследствие этого моменты переключения регулирующего воздействия также сдвигаются на τ , что приводит к возрастанию амплитуды и периода автоколебаний.

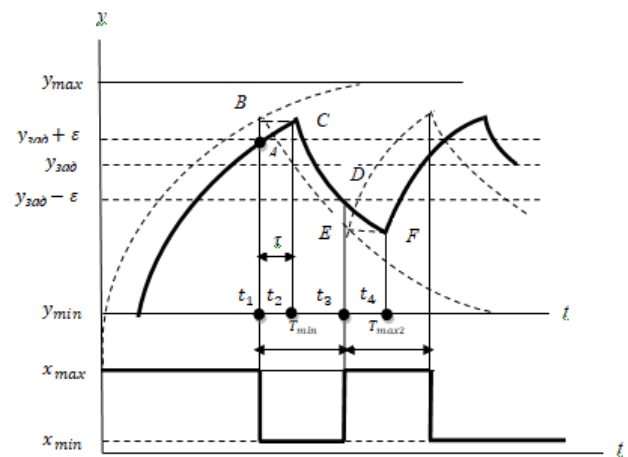


Рис. 5. Графики автоколебаний и регулирующего воздействия

При нанесении возмущения по реактивности $\Delta p = +0.004$ средняя температура теплоносителя первого контура понижается и давление падает (рис. 6), что приводит к включению одного ТЭНа на 4 с, тем самым давление стабилизируется. Далее давление повышается и переходит за гра-

ниці допустимых значений, что приводит к включению клапанов впрыска (на 8 с), таким образом устанавливается устойчивый автоколебательный процесс.

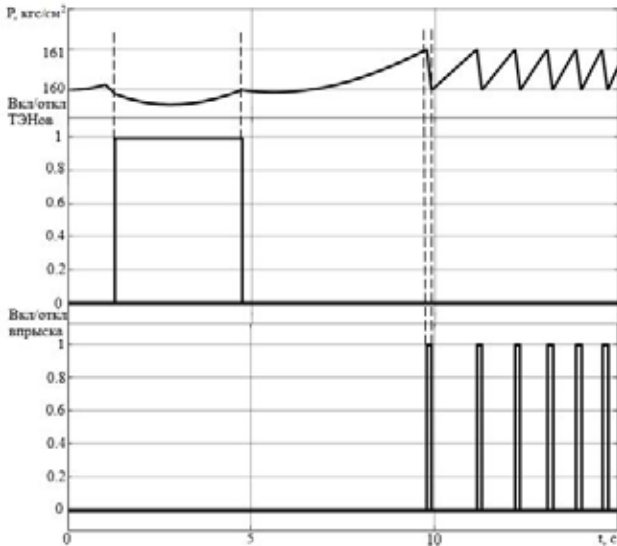


Рис. 6. Переходной процесс регулирования давления и вызвавшее его управляющее воздействие

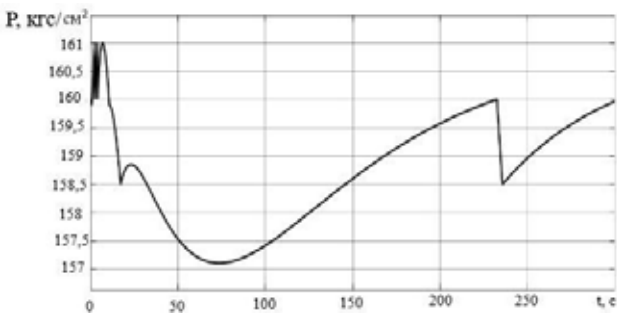


Рис. 7. Переходной процесс регулирования

При нанесении возмущения по реактивности $\Delta\rho = -0.004$ давление падает до 157 кг/см^2 (рис. 7), что приводит к включению одного ТЭНа. Так как его мощности недостаточно, подключается второй нагреватель, что можно наблюдать на рис. 8, и на 225 с давление ста-

билизируется и поддерживается в допустимом диапазоне.

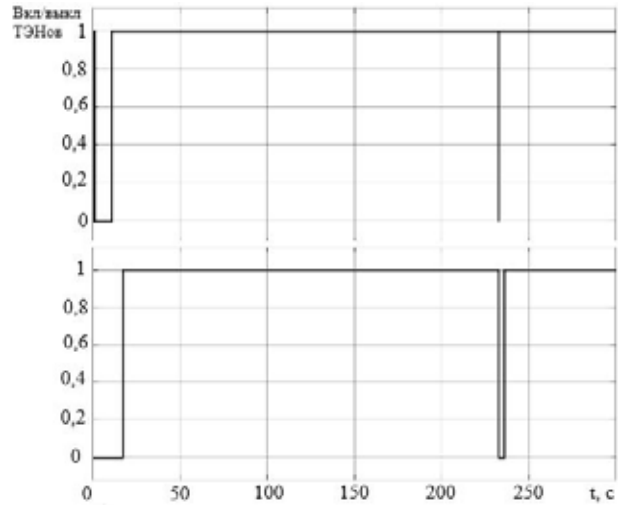


Рис. 8. Управляющее воздействие

Выводы. Создана имитационная модель компенсатора давления с использованием релейного регулятора. Компенсатор давления вызывает интерес в качестве объекта управления, так как обладает двумя видами управляющих воздействий для точного поддержания заданного давления. Таким образом, использование релейных законов управления является единственным возможным решением, так как позволяет настроить работу группы нагревателей, состоящих из 4 ТЭНов, а также группу впрыска, состоящей из двух клапанов. Система управления настроена таким образом, что в случае нехватки управляющего воздействия одного из клапанов впрыска параллельно включается второй клапан. Аналогично, при падении давления и недостаточности мощности трубчатого нагревателя последовательно подключаются незадействованные ТЭНы. Анализ качества полученных переходных процессов свидетельствует об их соответствии требованиям технологического регламента, ошибка регулирования давления не превышает $\pm 5 \text{ кг/см}^2$.

Список литературы:

1. Демченко В.А. Автоматизация и моделирование технологических процессов процессов АЭС и ТЭС / КБ «Теплоэнерго», 2001. Вып. 102 с.
2. Беркович В.М., Горохов В.Ф., Татарников В.П. О возможности регулирования мощности энергосистемы с помощью атомных электростанций. *Теплоэнергетика*. Вып. 6. 19 с.
3. Максимов М.В. Метод оценки эффективности алгоритма маневра мощностью энергоблока с реакторами ВВЭР-1000. *Известия вузов. Серия «Ядерная энергетика»*. 2008. Вып. 4. С. 128–139.
4. Баскаков В.Е. Алгоритм эксплуатации энергоблока с ВВЭР в поддержке суточного баланса мощности энергосистемы. *Труды Одесского политехнического университета*. 2007. Вып. 2 (28). С. 56–59.

5. Современные технологии управления : монография: в 2 т. / Под общ. ред. С.В. Куприенко; Sworld. Одесса : Куприенко С.В., 2012. 179 с.

6. Медведев Р.Б., Сангинова А.В. Оптимальное управление процессом изменения концентрации борной кислоты в теплоносителе первого контура АЭС с ВВЭР-1000. *Научные вестники Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт»*. 2002. Вып. 2 (22). С. 29–56.

7. Волошкина А.А., Беглов К.В., Плахотнюк А.А. Исследование регулятора концентрации жидкого поглотителя энергоблока АЭС. *Автоматизация технологических и бизнес-процессов*. 2015. Т. 7. Вып. 4. С. 18–24.

8. Плетнев Г.П. Автоматизированное управление объектами тепловых электростанций. Москва : Энергоиздат, 1981. 159 с.

НАЛАШТУВАННЯ РЕЛЕЙНОГО РЕГУЛЯТОРА НА ПРИКЛАДІ КОМПЕНСАТОРА ТИСКУ АЕС: ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ КТ

Особливість процесів управління в системі компенсації тиску АЕС із ВВЕР-1000 полягає в тому, що деякі з регуляторів впливають на одні і ті самі виконавчі механізми, тільки в різних режимах роботи. У стаціонарному стані потужність ТЕНів (трубчастий електронагрівач) компенсує втрати теплоти в навколишнє середовище. При зниженні температури теплоносія частина цього теплоносія переходить у перший контур. Пар у компенсаторі тиску (КТ) розширюється і тиск його падає. Задля його відновлення необхідно збільшити потужність ТЕНів. При збільшенні потужності реактора процеси відбуваються в зворотному напрямі. При великих і швидких підвищеннях тиску використовується вприскування води з холодної нитки циркуляційного контуру. Якщо після відкриття клапанів уприскування тиск у компенсаторі продовжує зростати, то пар скидається в барботер. Якщо це не допомагає, то в атмосферу. Таким чином, однією з регульованих величин є тиск теплоносія. Проаналізовано питання про створення імітаційної моделі КТ із використанням релейного регулятора.

Ключові слова: релейний регулятор, тиск, АЕС, виконавчі механізми, компенсатор тиску, система управління.

RELAY REGULATOR SETTINGS ON THE EXAMPLE OF NPP PRESSURE COMPENSATOR: PC SIMULATION MODEL

The peculiarity of control processes in the pressure compensation system of NPPs with VVER-1000 is that some of the regulators act on the same actuators, only in different operating modes. In steady state, the power of the heating element (tubular electric heater) compensates for the loss of heat into the environment. When the temperature of the coolant decreases, a part of this coolant passes to the first circuit. The vapor in the pressure compensator (PC) expands and its pressure drops. To restore it, it is necessary to increase the power of heating elements. With increasing reactor power, the processes occur in the opposite direction. With large and rapid increases in pressure, water is injected from the cold filament of the circulation circuit. If, after opening the injection valves, the pressure in the compensator continues to increase, the steam is discharged into the bubbler. If this does not help, then the atmosphere. Thus, one of the regulated values is the pressure of the coolant. Analyzed the issue of creating a simulation model of the PC with the use of a relay controller.

Key words: relay controller, pressure, nuclear power plant, actuator, pressure compensator, control system.