

УДК 681.51

Ермаков И.А.

Одесский национальный политехнический университет

Ложечников В.Ф.

Одесский национальный политехнический университет

ИНВАРИАНТНАЯ СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ УРОВНЯ В УСТАНОВКЕ ГЕНЕРИРОВАНИЯ ПАРА ДЛЯ ЭНЕРГОБЛОКА 1000 МВт АТОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Производство пара на атомных электростанциях с ВВЭР-1000 осуществляется в специальных теплообменных установках – парогенераторах. Показана актуальность применения инвариантной системы автоматического регулирования в парогенераторах. Как альтернатива классической трёхимпульсной, имеющейся на эксплуатации на энергоблоках ВВЭР-1000, для регулирования уровня предложена инвариантная система автоматического регулирования, которая значительно повышает качество регулирования уровня, а также надёжность процесса регулирования.

Ключевые слова: инвариантная система регулирования, трёхимпульсная система регулирования, автоматизация, модель динамики.

Постановка проблемы. На энергоблоках атомных электростанций (далее – АЭС) с ВВЭР-1000 для поддержания уровня пароводяной смеси в парогенераторах используется трёхимпульсные автоматические системы управления с аналоговыми регуляторами. В этих системах на вход регулятора, кроме основного сигнала по уровню воды, поступают также сигналы по расходу пара и питательной воды. Расчёт указанной системы обоснован положением классической теории автоматического управления (схема регулирования с контуром инвариантности по основному возмущающему воздействию), и для их параметризации используются инженерные методы определения настроек регулятора.

Анализ последних исследований и публикаций. Инвариантная система автоматического регулирования при плановом изменении нагрузки, структура которой выбирается на основе использования метода структурно-параметрической оптимизации динамических систем [5, с. 70–71]. В этой публикации передаточную функцию устройства компенсации находят из условия инвариантности основной регулируемой величины по отношению к крайнему внешнему возмущению с учетом заданной передаточной функции системы по основной регулируемой величине.

Постановка задания. Классическая трёхимпульсная система стабилизации уровня не обеспечивает полной инвариантности от приведен-

ных возмущений. Но при принятых режимных значениях работы парогенератора инвариантную систему разработать невозможно, однако, если несколько изменить температуру и давление питательной воды, такая технология становится возможной.

Изложение основного материала исследования. Производство пара на АЭС с ВВЭР-1000 осуществляется в специальных теплообменных установках – парогенераторах (далее – ПГ). В ПГ осуществляется передача тепла, которая отводится от активной зоны реактора охлаждающей средой (теплоносителем 1 контура) до котельной воды 2 контура. Котельная вода ПГ, омывая теплообменные трубки, нагревается, вскипает и превращается в насыщенный пар. Рабочий пар из ПГ по паропроводу движется в паровую турбину, в проточной части которой тепло преобразуется в механическую энергию ротора турбины. ПГ, вместе с реактором, главным циркуляционным насосом и турбогенератором, относится к основному оборудованию АЭС. Управление питанием в каждом из ПГ сводится к поддержке материального баланса между отводом пара, продувкой и подачей питательной воды. Параметром, характеризующим материальный баланс, является уровень воды в ПГ [1, с. 50].

К стабилизации уровня предъявляются достаточно жесткие требования. Для ПГ с ВВЭР-1000 номинальный уровень $L_{ном}$ составляет 2 450 мм.

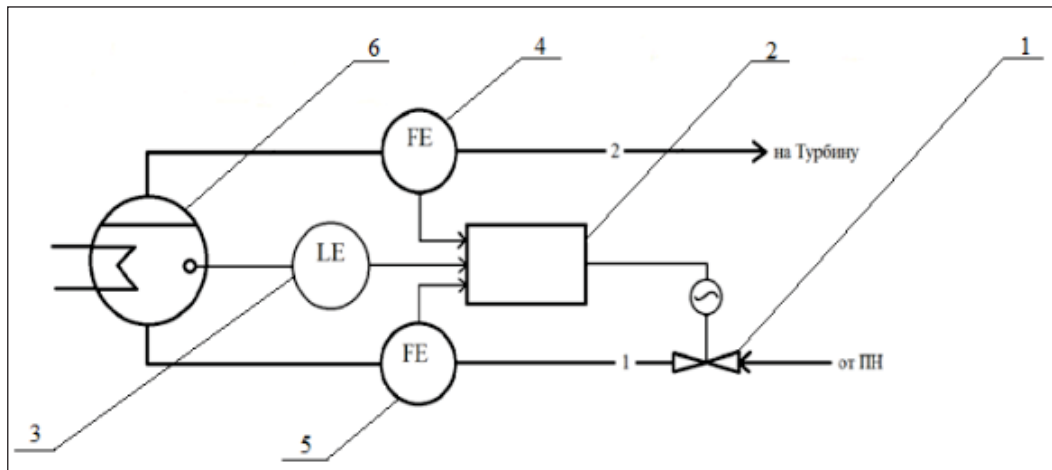


Рис. 1. Трёхимпульсная схема регулирования уровня воды в ПГ:
 1 – исполнительный механизм питательного клапана; 2 – регулятор;
 3 – сигнализатор по уровню; 4 – сигнализатор по расходу пара;
 5 – сигнализатор по расходу воды; 6 – парогенератор

Точность поддержания уровня в статических режимах составляет ± 50 мм от $L_{\text{ном}}$, в динамике ± 150 мм от $L_{\text{ном}}$ (с учетом нечувствительности регулятора). Повышение уровня воды не допускается из-за затопления и нарушения работы устройств (попадание воды в турбину), а снижение уровня – из-за обнажения поверхности нагрева.

Возмущающими воздействиями на уровень являются:

- расход пара (нагрузки);
- изменение расхода питательной воды и продувки;
- изменение температуры питательной воды;
- изменение теплопровода со стороны первого контура (изменение средней температуры первого контура или отключения ГЦН).

При возмущении расходом пара или отключении ГЦН проявляется явно выраженное «набухания» уровня, то есть изменение его в начальные моменты времени в сторону, которая не соответствует знаку возмущающего воздействия. Явление «набухания» можно объяснить так. При изменении расхода пара, например, увеличении, давление в ПГ уменьшается, происходит дополнительное вскипание воды, увеличение уровня. В дальнейшем уровень начинает падать, так как расход пара увеличился, а расход питательной воды остался прежним. При отключении ГЦН теплоподвод в ПГ резко уменьшается, интенсивность кипения и объем пузырьков пара уменьшаются, что приводит к снижению уровня. Однако уменьшение парообразования приводит к снижению давления и некоторого увеличения парообразования. Однако

первый фактор существенный, расход питательной воды остался неизменным [5, с. 53].

На рис. 1 изображена трехимпульсная схема регулирования уровня воды. В данной схеме исполнительный механизм питательного клапана управляется регулятором, на вход которого подаются сигналы по уровню, расходу пара и расходу воды. Использование трехимпульсной автоматической системы регулирования (далее – АСР) уровня воды в ПГ с ПИ-регулятором позволяет с импульсами по расходу питательной воды и пара регулировать объект с эффектом «набухания».

Динамические свойства ПГ являются неблагоприятными с точки зрения стабилизации уровня воды. Этим объясняется тот факт, что для автоматического регулирования уровня не пригодны обычные одноконтурные системы регулирования.

Принцип работы классической 3-импульсной АСР (рис. 1) следующий. Сигналы по расходу пара и питательной воды вводятся в регулятор с противоположными знаками. В установившемся состоянии эти сигналы равны, противоположные по знаку и, следовательно, компенсируют друг друга.

Сигнал по уровню воды в ПГ компенсируется сигналом задания. При изменении расхода пара мгновенно меняется соответствующий сигнал на входе в регулятор, и последний пропорционально изменяет расход питательной воды, не дожидаясь изменения уровня.

Таким образом, возможно подавление скачкообразных возмущений расходом пара величиной до 18 кг/с без выхода уровня из пятидесятимил-

лиметровой зоны. При всем этом получаем аperiodический переходный процесс регулирования.

Передаточная функция ПГ описывается как сумма четырёх параллельно соединенных блоков, учитывающих динамические свойства ПГ.

Таким образом, математическая модель объекта для классической трёхимпульсной системы примет вид:

– по каналу «Расход питательной воды – уровень»:

$$W(s)_{\Delta M_{ПВ}} = \frac{1}{s} \cdot \frac{-8.7 \cdot 10^3 \cdot s + 100}{6.7 \cdot 10^{12} \cdot s + 200.7 \cdot 10^9} \quad (1);$$

– по каналу «Расход пара – уровень»:

$$W(s)_{\Delta MD} = \frac{1}{s} \cdot \frac{7.1 \cdot 10^3 \cdot s - 100.3}{6.7 \cdot 10^{12} \cdot s + 200.7 \cdot 10^9} \quad (2);$$

– по каналу «Температура питательной воды – уровень»:

$$W(s)_{\Delta MD} = \frac{1}{s} \cdot \frac{15 \cdot 10^6 \cdot s - 142 \cdot 10^3}{6.7 \cdot 10^{12} \cdot s + 200.7 \cdot 10^9} \quad (3);$$

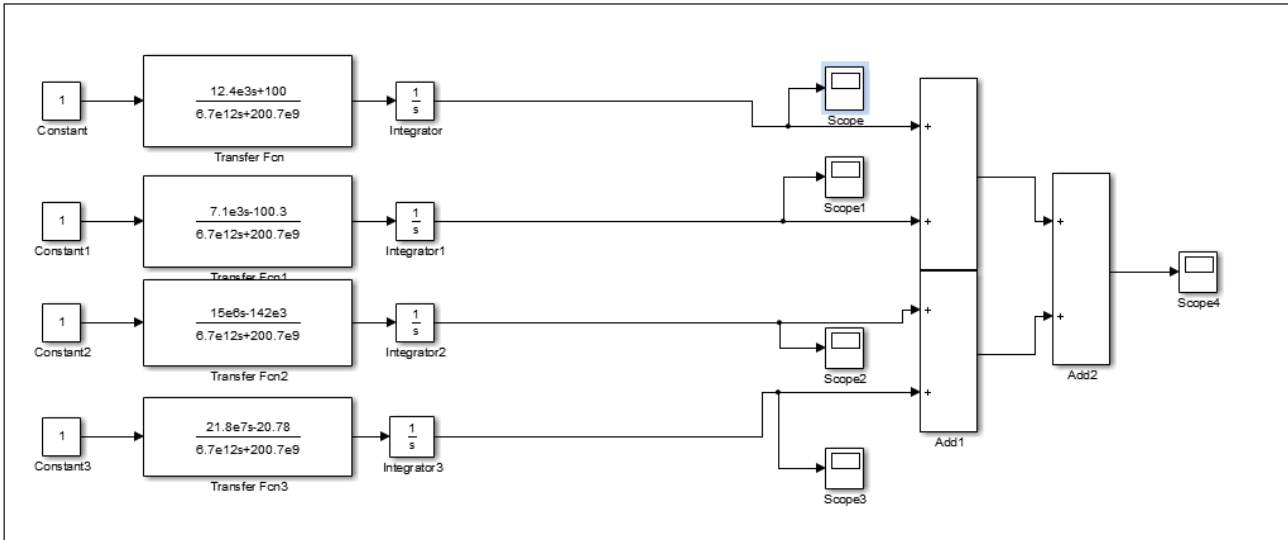


Рис. 2. Структурная схема исследования кривых разгона объекта управления

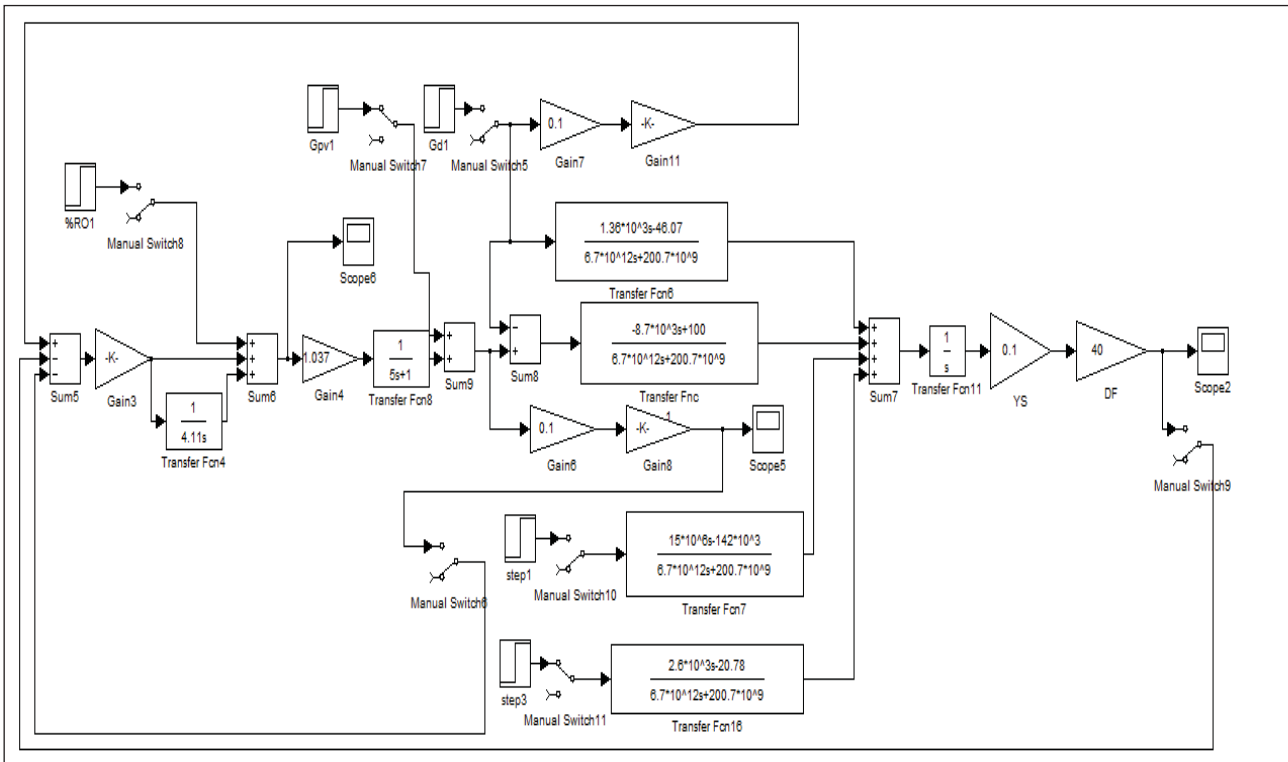


Рис. 3. Модель классической трёхимпульсной АСР уровня воды в ПГ

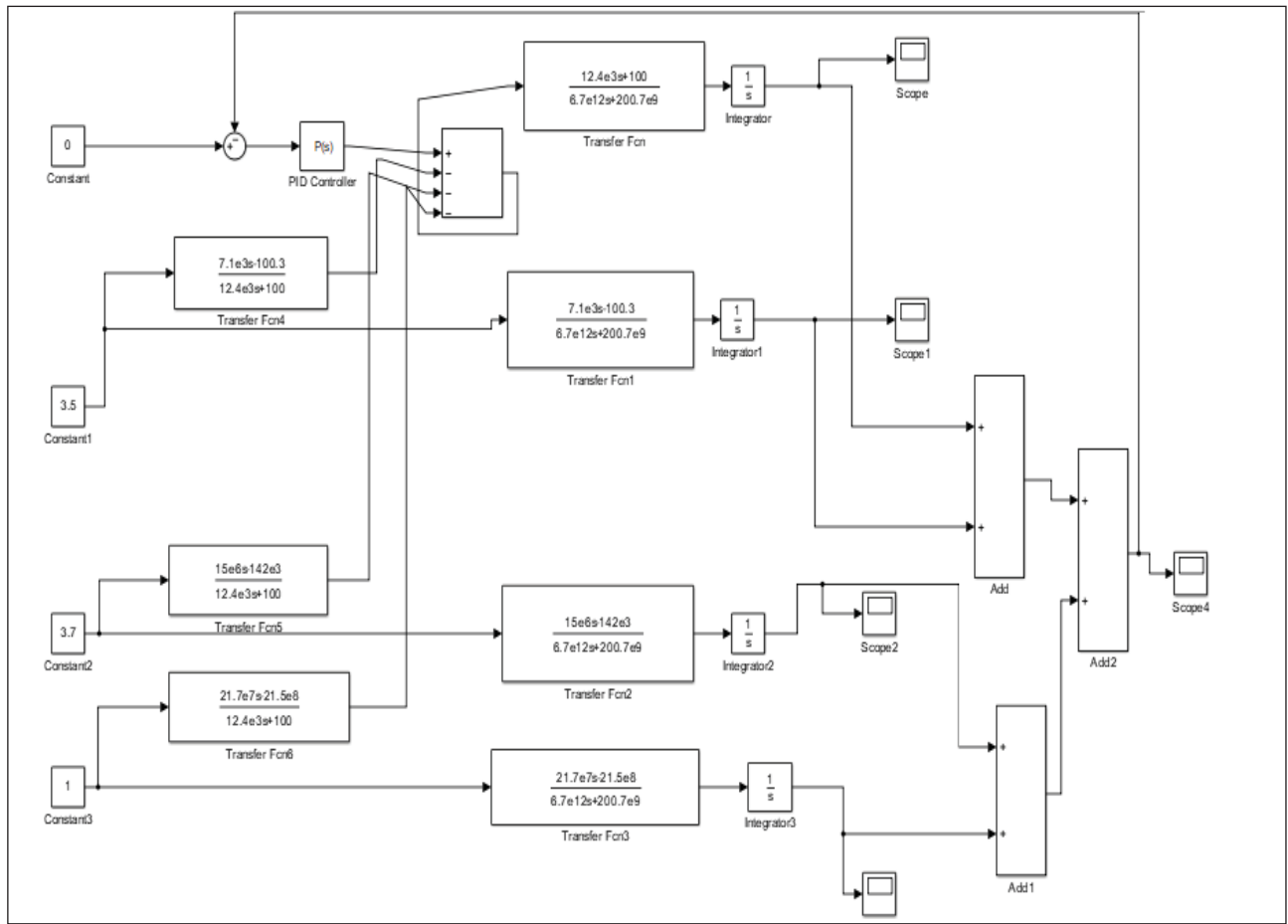


Рис. 4. Модель инвариантной АСР уровня воды в ПГ

– по каналу «Тепловосприятие экранов – уровень»:

$$W(s)_{\Delta M_{\Delta T}} = \frac{1}{s} \cdot \frac{21.8 \cdot 10^8 \cdot s - 17.5 \cdot 10^5}{6.7 \cdot 10^{12} \cdot s + 200.7 \cdot 10^9} \quad (4).$$

С учетом рассчитанных численных значений параметров передаточных функций элементов АСР построено структурную схему исследования кривых разгона в Simulink, представленную на рис. 2. Модель классической трёхимпульсной АСР уровня воды в ПГ представлена на рис. 3.

Поскольку математическая модель трёхимпульсной системы управления по каналу «отклонение расхода питательной воды – отклонение уровня» содержит знак «-» в числителе передаточной функции, то инвариантную систему разработать невозможно. Однако можно заметить, что, если поднять температуру питательной воды с 220°C до 280°C, то коэффициенты числителя станут положительными, и тогда имеет место разработка инвариантной системы управления. Это технически возможно выполнить – такая температура меньше, чем температура воды первого кон-

тура, а для того, чтобы вода не закипела, следует поднять давление воды с 6,4 МПа до 7,0 МПа, что позволяет турбонасос ПВД.

Таким образом, математическая модель объекта для разработки инвариантной системы примет вид:

– по каналу «Расход питательной воды – уровень»:

$$W(s)_{\Delta M_{ПВ}} = \frac{1}{s} \cdot \frac{12.4 \cdot 10^3 \cdot s + 100}{6.7 \cdot 10^{12} \cdot s + 200.7 \cdot 10^9} \quad (5);$$

– по каналу «Расход пара – уровень»:

$$W(s)_{\Delta M_D} = \frac{1}{s} \cdot \frac{7.1 \cdot 10^3 \cdot s - 100.3}{6.7 \cdot 10^{12} \cdot s + 200.7 \cdot 10^9} \quad (6);$$

– по каналу «Температура питательной воды – уровень»:

$$W(s)_{\Delta M_{\Delta T}} = \frac{1}{s} \cdot \frac{15 \cdot 10^6 \cdot s - 142 \cdot 10^3}{6.7 \cdot 10^{12} \cdot s + 200.7 \cdot 10^9} \quad (7);$$

– по каналу «Тепловосприятие экранов – уровень»:

$$W(s)_{\Delta M_{\Delta T}} = \frac{1}{s} \cdot \frac{21.8 \cdot 10^8 \cdot s - 17.5 \cdot 10^5}{6.7 \cdot 10^{12} \cdot s + 200.7 \cdot 10^9} \quad (8).$$

С учетом рассчитанных численных значений параметров передаточных функций элементов АСР построена разработанная инвариантная модель системы в Simulink, представлена на рис. 4.

Для полного расчёта разработки ниже приведём расчёт введённых компенсаторов.

$$W_k = \frac{12.4 \cdot 10^3 \cdot s + 100}{6.7 \cdot 10^{12} \cdot s + 200.7 \cdot 10^9} = \frac{7.1 \cdot 10^3 \cdot s - 100.3}{12.4 \cdot 10^3 \cdot s + 100} \quad (9)$$

Предложено решение о компенсации возмущения по каналу «Расход питательной воды – уровень», проведём сравнительный анализ между кривыми разгона трёхимпульсной АСР и инвариантной АСР.

Разгонные характеристики по каналу «Расход питательной воды – уровень» на рис. 5 имеют вид:

Из анализа графиков кривых разгона видно, что предлагаемая инвариантная АСР имеет преимущества над классической трёхимпульсной АСР, а именно в компенсировании возмущения.

Ниже представим графики переходных процессов, предлагаемой инвариантной АСР и классической трёхимпульсной АСР при основных воздействиях, приведенные на рис. 6 и рис. 7. Результатом регулирования трёхимпульсной АСР получили отклонения в -0.14% при возмущениях 1% от номинальных значений.

В результате введения компенсаторов для возмущений в разработанную инвариантную систему автоматического регулирования и при задании в

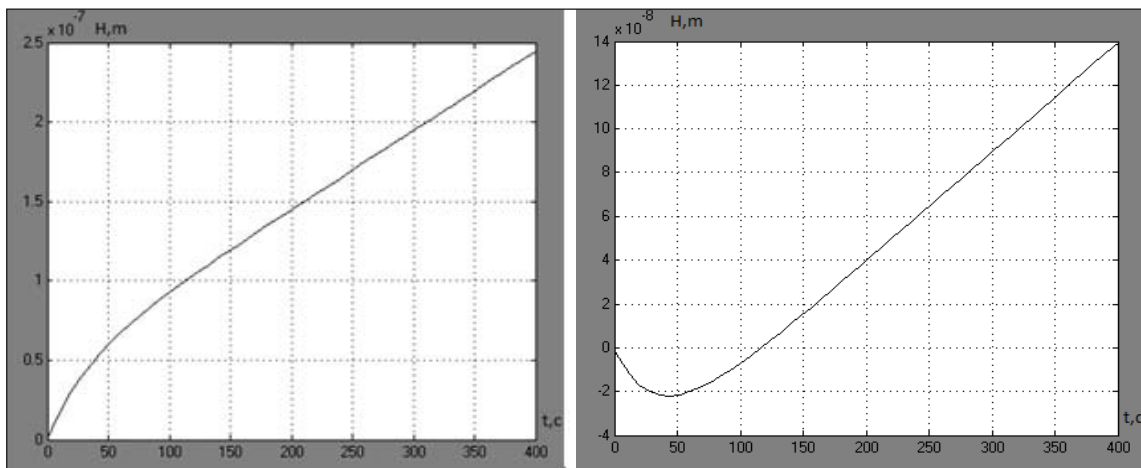


Рис. 5. Кривая разгона по каналу «Расход питательной воды – уровень» инвариантной АСР (а), трёхимпульсной АСР (б)

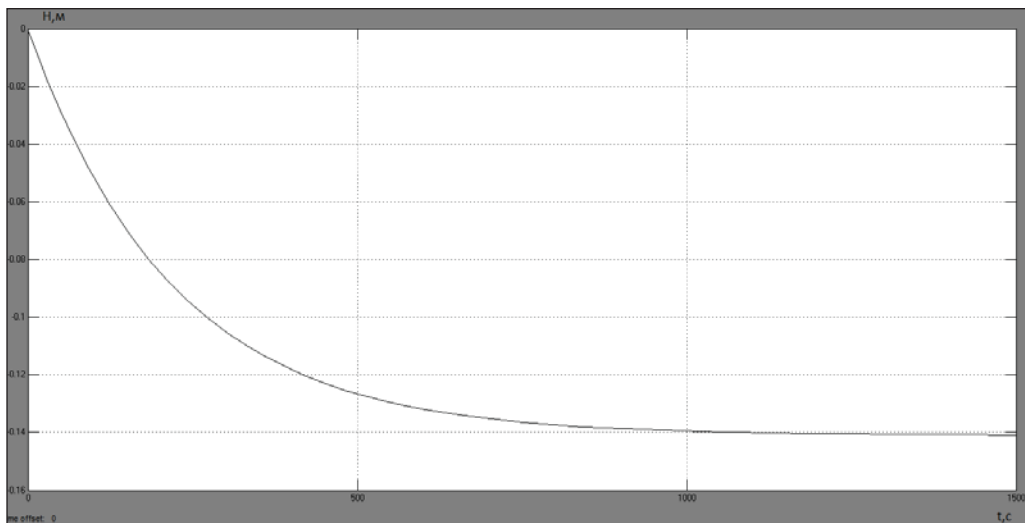


Рис. 6. Переходный процесс отклонения уровня возмущений и задании в 1% от номинальных значений

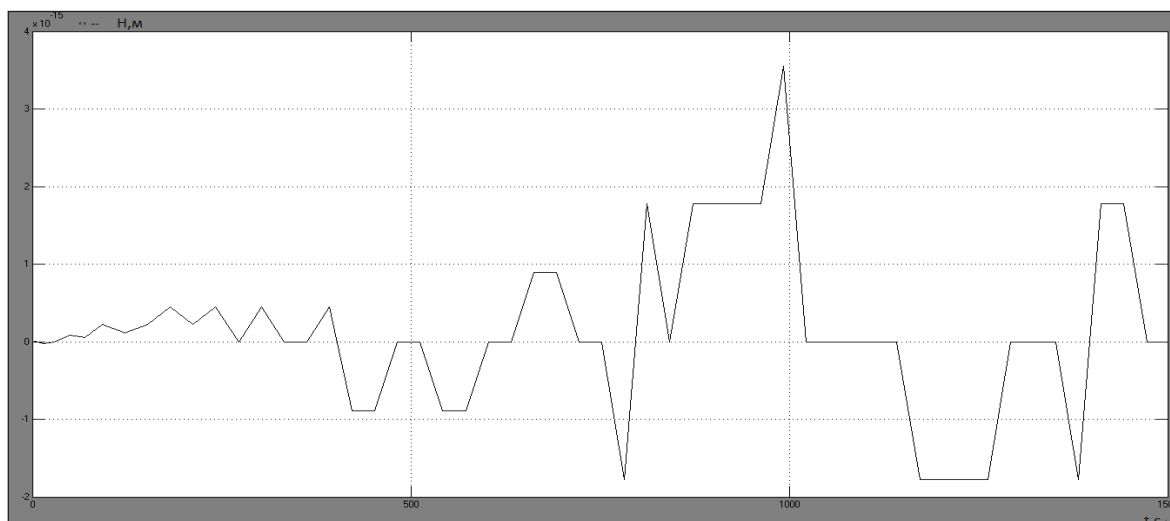


Рис. 7. Переходний процес відхилення рівня возмущений и задания в 10% от номинальных значений

10% от номинальных значений получаем отклонения в $3,5 \cdot 10^{-15}$.

Как видно из переходных процессов, инвариантная система автоматического регулирования выполняет свои поставленные задачи качественно, чем трёхимпульсна АСР. Добавление компенсаторов по каждому каналу возмущений позволило ускорить получение нужного регулирования.

Выводы. Для определения динамических характеристик установки генерирования пара получила дальнейшее развитие математическая модель, основанная на решении уравнений сохранения массы, энергии и объема. Была произведена

линеаризация системы нелинейных уравнений. Такая модель позволяет определить количественный состав условной формулы динамики установившегося генерирования пара. В результате проведенного анализа влияния внешних возмущений определены разгонные кривые по возмущающим каналам. Для обеспечения качественной поддержки уровня и его регулирования в установке генерирования пара предложен метод, основанный на изменении номинальных значений температуры питательной воды и давления пара.

Разработанное математическое описание может быть использовано для дальнейшего синтеза системы автоматического регулирования.

Список литературы:

1. Демченко В.А. Автоматизация и моделирование технологических процессов АЭС и ТЭС. Одесса «Астропринт», 2001. 50 с.
2. Демченко В.А. Разработка математической модели динамики парогенератора ПГВ-1000 АЭС. Черкассы, 1997. Т. 1. С. 20–69.
3. Тошинський В.І., Бабіченко А.К., Молчанов В.І. та ін. Технічні засоби автоматизації. Ч. 2. Мікропроцесорні регулювальні та виконавчі пристрої: навч. посіб. / за ред. А.К. Бабіченка. Київ, 1977. С. 200.
4. Штапова А.Г., Мефедова Ю.А. Моделирование системы автоматического регулирования уровня воды в парогенераторе атомной электростанции. Молодой ученый. 2015. № 22.5. С. 53–56.
5. Кулаков Г.Т., Кухоренко А.Н., Голинко И.М. Инвариантная система автоматического регулирования. Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2015. С. 70–71.

ІНВАРІАНТНА СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ РІВНЯ В УСТАНОВЦІ ГЕНЕРУВАННЯ ПАРИ ДЛЯ ЕНЕРГОБЛОКУ 1000 МВТ АТОМНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

Виробництво пари на атомних електростанціях із ВВЕР-1000 здійснюється в спеціальних теплообмінних установках – парогенераторах. Показана актуальність застосування інваріантної системи автоматичного регулювання рівня в парогенераторах. Як альтернатива класичній трьохімпульсній, що експлуатується на енергоблоках ВВЕР-1000, для регулювання рівня запропонована інваріантна сис-

тема автоматичного регулювання, яка істотно підвищує якість регулювання рівня, а також надійність процесу регулювання.

Ключові слова: інваріантна система регулювання, трьохімпульсна система регулювання, автоматизація, математична модель, парогенератор.

INVARIANT SYSTEM OF AUTOMATIC CONTROL OF LEVEL IN THE STEAM GENERATION AT POWER UNIT 1000 MW OF NUCLEAR POWER PLANT

The production of steam at nuclear power plants with VVER-1000 is carried out in special heat units – steam generators. The urgency of an invariant system of automatic control in steam generators is shown. As an alternative to the classical three-pulse, available for operation at VVER-1000 power units, an invariant system of automatic control is proposed for level regulation. Which significantly improves the quality of level control, as well as the safety of the control process.

Key words: invariant control system, three-pulse control system, automation, mathematical model, steam generator.