

УДК 681.51

**Ермаков И.А.**

Одесский национальный политехнический университет

**Ложечников В.Ф.**

Одесский национальный политехнический университет

## УСОВЕРШЕНСТВОВАНАЯ СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ УРОВНЯ ВОДЫ С СИГНАЛОМ ПО РАЗНИЦЕ ТЕМПЕРАТУР В УСТАНОВКЕ ГЕНЕРИРОВАНИЯ ПАРА ЭНЕРГОБЛОКА ВВЭР-1000 АЭС

*Генерирование насыщенного пара в энергоблоках АЭС с ВВЭР осуществляется в парогенераторах (четыре парогенератора на энергоблок). Важнейшим регулируемым параметром в ПГ АЭС, как и для котлов ТЭС, является уровень воды, от точности поддержания которого зависит качество пара и надёжность. Совершенствование автоматизированных систем управления технологическими процессами барабанных котлов средней мощности и энергоблоков АЭС является важнейшим средством повышения их эффективности и надёжности и одним из необходимых условий повышения качества и снижения себестоимости конечного продукта, повышения его конкурентоспособности как на внутреннем, так и на внешнем рынках, способствует экономическому росту и техническому престижу Украины.*

**Ключевые слова:** автоматическая система регулирования, трёхимпульсная система регулирования, автоматизация, модель динамики.

**Постановка проблемы.** Эффективное управление барабанными котлами средней мощности и парогенераторами (ПГ) АЭС с ВВЭР в нормальных и аварийных режимах в значительной мере обеспечивает динамическую устойчивость системы регулирования как отдельного котлоагрегата, так и всего энергоблока. Важнейший параметр, от которого зависит выполнение этих функций, – уровень воды в барабанном ПГ, который должен поддерживаться на определённом нормированном значении. Работа двух рассматриваемых АСР взаимосвязана. Динамические свойства соответствующих объектов управления различны. В настоящее время каждая АСР настраивается индивидуально, как правило, экспериментально на действующем объекте, что при совместной работе не обеспечивает требуемых показателей качества регулирования.

Указанные причины приводят к необходимости разработки математической модели участка питания и исследования на ней совместной работы типовых схем регулирования и синтеза новых оптимальных многомерных АСР.

**Анализ последних исследований и публикаций.** В статье «Оптимальный ПИ-регулятор уровня воды в парогенераторе энергоблока АЭС с реактором ВВЭР-1000» [4] авторы (В.А. Демченко, А.А. Стопакевич, В.Ф. Ложечников) пришли к выводу, что в ряде парогенераторов сиг-

нал по расходу пара заменён сигналом по разности температур теплоносителя первого контура на входе и выходе реактора, что исключает необратимые потери давления пара на сужающем устройстве. Такая схема, уступая по качеству регулирования схеме с сигналом по расходу свежего пара, выполняет возложенные на неё функции. Расчёт указанных систем 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 [4, с. 1].

В настоящее время ведётся работа этими учёными, а именно по предложению новых моделей и методов качественного регулирования уровня, а также по улучшению уже известных разработанных систем регулирования. В вопросе выбора системы автоматического регулирования уровня нельзя не учитывать минимальные шансы на сбой и поломки. Поэтому проблема внедрения и испытания новых и улучшенных старых систем требует испытания на реальных объектах.

**Формулирование целей статьи.** Классическая трёхимпульсная система поддержания уровня не до конца обеспечивает полной или частичной независимости от приведённых возмущений. Поэтому необходимо провести анализ усовершенствованной АСР и классиче-

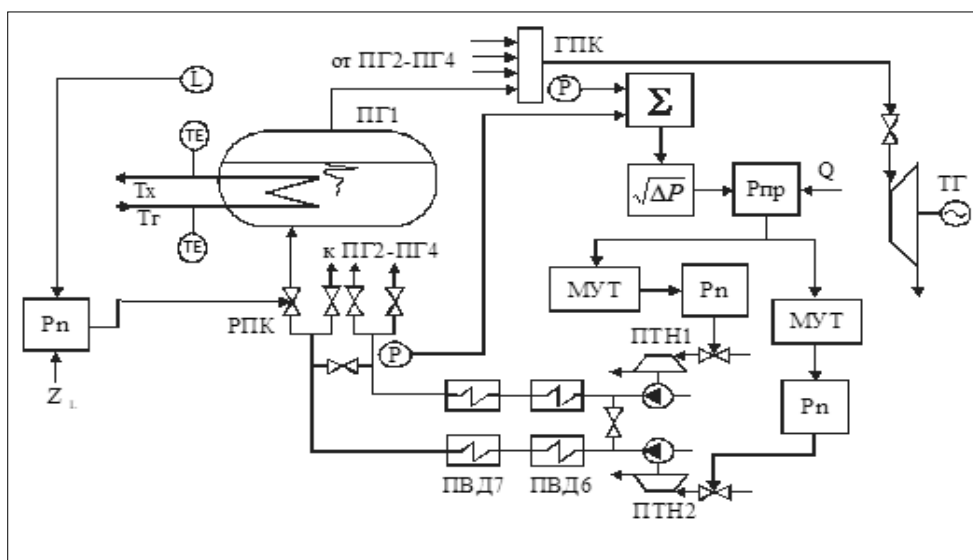


Рис. 1. Принципиальная схема автоматического регулирования производительности ПТН и питания ПГ

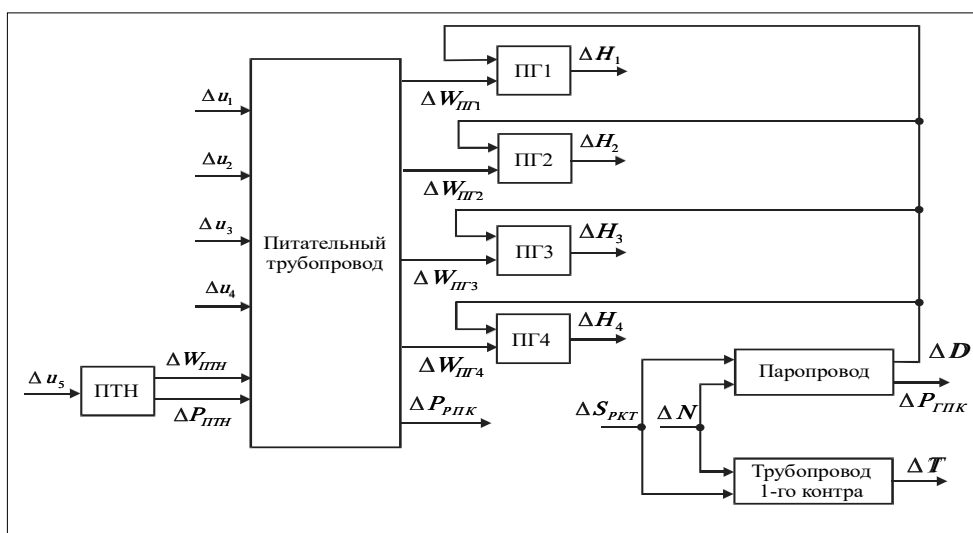


Рис. 2. Структурная схема участка питания парогенераторов АЭС с ВВЭР

скої тріхімпульсної систем автоматичного регулювання.

**Изложение основного материала исследования.** Участок питания парогенератора двухконтурных энергоблоков АЭС с ВВЭР является важнейшим элементом тепловой схемы. От его надёжной и экономичной работы зависит надёжность и экономичность работы всего энергоблока.

В участок питания входят (рис. 1): питательные турбонасосы (ПТН), питательные трубопроводы с двумя подогревателями высокого давления (ПВД) и регулирующими питательными клапанами (РПК) перед каждым парогенератором (ПГ), который обогревается теплоносителем первого контура энергоблока, паропроводы от ПГ до турбо-

генератора (ТГ) с главным паровым коллектором (ГПК). Управление этим оборудованием осуществляется двумя основными системами автоматического регулирования – трёхимпульсной автоматической системой регулирования (АСР) питания парогенератора, задачей которой является поддержание материального баланса между отводом пара, продувкой и подачей питательной воды и АСР производительности ПТН, которая изменяет расход питательной воды путём изменения числа его оборотов. Назначение её заключается в том, чтобы при изменении расхода питательной воды регулятором питания при изменении нагрузки блока регулирующей питательный клапан (РПК) сохранял неизменную степень открытия. При

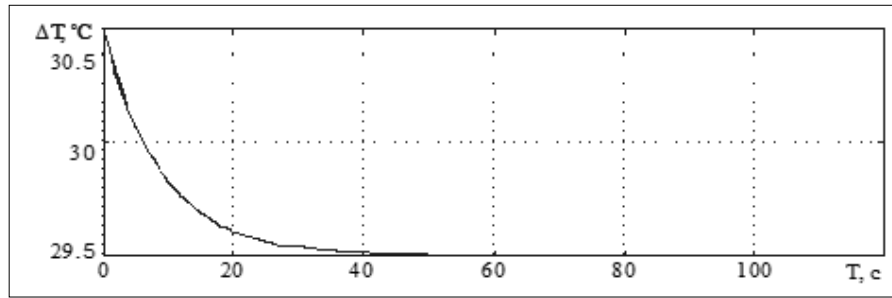


Рис. 3. Изменение разности температур теплоносителя первого контура

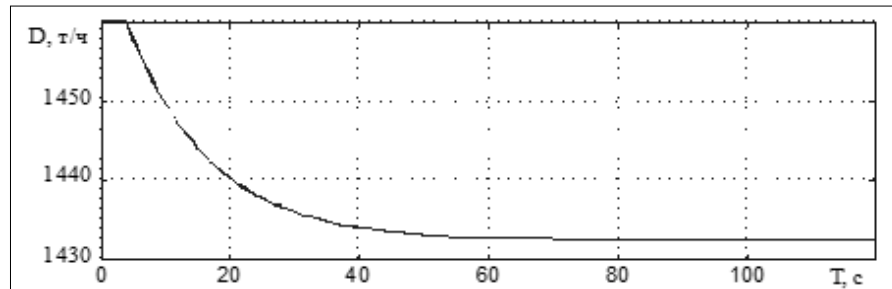


Рис. 4. Изменение расхода пара из парогенератора

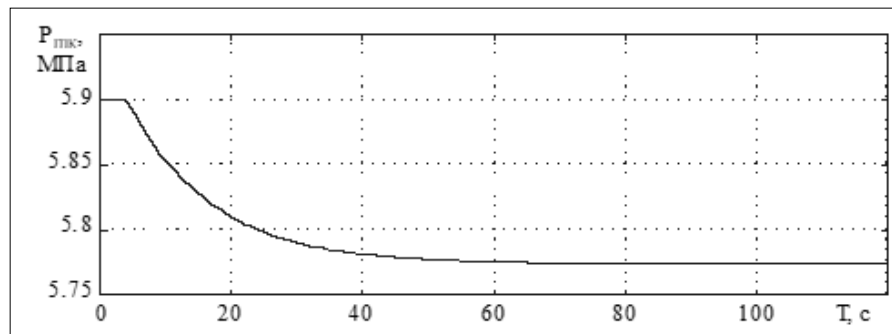


Рис. 5. Изменение давления пара в главном паровом коллекторе

такой работе РПК уменьшаются потери энергии на дросселирование и уменьшается его износ из-за уменьшения перепада давления на нём.

В настоящее время рассматриваемые АСР реализованы на основе локальных регуляторов системы «Каскад», или в случае применения цифровых управляющих комплексов программируются на основе типовых законов регулирования. Указанные причины приводят к необходимости разработки математической модели участка питания и исследования на ней совместной работы типовых схем регулирования и синтеза новых оптимальных многомерных АСР.

Регулятор производительности  $R_{пр}$  пропорционально-интегрального действия получает сигнал, пропорциональный корню квадратному из  $\Delta P = P_{РПК} - P_{ГПК}$  ( $P_{РПК}$  – давление питательной воды перед РПК,  $P_{ГПК}$  – давление пара ГПК), в качестве задающего сигнала на его вход поступает сигнал  $Q$  тепловой мощности петли, равной

$Q = (T_r - T_x) \cdot \sqrt{\Delta P}$  ( $T_r$  – температура теплоносителя первого контура перед ПГ,  $T_x$  – температура теплоносителя первого контура после ПГ). Регулятор воздействует на механизм управления турбиной (МУТ) регулятора скорости вращения  $R_n$  каждого из ПТН, что приводит к изменению расхода пара на приводную турбину, скорости её вращения и, соответственно, производительности насоса. В качестве сигнала  $Q$  используется максимальный сигнал из сигналов четырёх циркуляционных петель первого контура энергоблока. В АСР питания ПГ сигналы по расходу пара и питательной воды вводятся в регулятор с противоположными знаками и компенсируют друг друга. Сигнал по уровню воды в ПГ компенсируется сигналом задания. В этой схеме реализуется пропорциональный (П) закон регулирования с инвариантностью по возмущению расходом пара [1, с. 50].

Для рассматриваемых АСР в соответствии с принципиальной схемой автоматического регу-

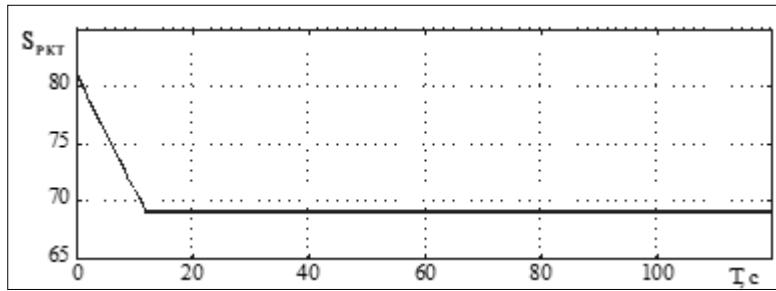


Рис. 6. Изменение положения регулирующих клапанов турбины

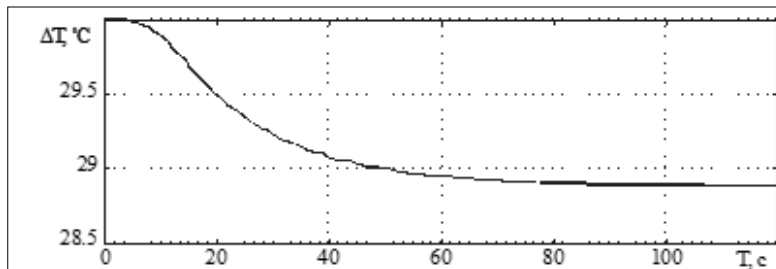


Рис. 7. Изменение разности температур теплоносителя первого контура

лирования (рис. 1) розроблена структурна схема участка питания барабанных парогенераторов (рис. 2). В схеме выделены следующие структурные элементы, которые отражают свойства реальных конструктивных элементов схемы участка питания барабанных парогенераторов: парогенераторы ПГ 1, 2, 3, 4, которые учитывают динамику изменения уровня пароводяной смеси в парогенераторе  $\varnothing H$  при изменении расходов питательной воды  $\varnothing W_{ПГ}$  и пара  $\varnothing D$ ; питательный трубопровод, который является связующим элементом участка питания, учитывает динамику изменения расхода питательной воды в результате изменения положения РПК ( $\varnothing u_1, \varnothing u_2, \varnothing u_3, \varnothing u_4$ ) и динамику изменения давления питательной воды перед регулируемыми питательными клапанами  $\varnothing P_{РПК}$  в результате изменения производительности ПТН; питательный турбонасос, определяющий динамику изменения подачи питательной воды  $\varnothing W_{ТНН}$  в парогенераторы через питательный трубопровод и изменение давления питательной воды  $\varnothing P_{ТНН}$  на выходе ПТН в результате изменения положения регулирующих клапанов  $\varnothing u_5$  приводной турбины ПТН; главный паропровод от парогенераторов до главного парового коллектора и трубопровод первого контура. Внутренним возмущением для участка питания является изменение тепловой мощности энергоблока  $\varnothing N$ , которое приводит к изменению количества генерируемого пара в парогенераторах и, как следствие, изменению расхода  $\varnothing D$  и давления  $\varnothing P$  пара в главном паропроводе. Изменение тепловой мощности

характеризуется изменением разности температур  $\varnothing T$  горячей и холодной петель первого контура. В качестве внешнего возмущения принято изменение положения регулирующих клапанов турбины  $\varnothing S_{РКТ}$ , которое сопровождается резким изменением расхода пара через паропровод и изменением давления пара в ГПК. Изменение расхода пара через паропровод приводит к нарушению материального баланса между поступающей в ПГ питательной водой и отбираемым из него паром. Регулятор уровня, стремясь восстановить материальный баланс, изменяет расход питательной воды, что в свою очередь приводит к изменению условий теплообмена между пароводяной смесью в парогенераторе и теплообменным пучком первого контура. При этом изменяется разность температур теплоносителя первого контура. Поскольку процесс изменения разности температур имеет намного большую инерционность, чем скорость изменения расхода питательной воды, то при разработке математической модели участка питания для упрощения расчёта и уменьшения размерности математической модели влияние расхода питательной воды на разность температур теплоносителя первого контура и процесс генерации пара будет учитываться косвенно через каналы внутреннего возмещения по реактивности и внешнего – изменением расхода пара на главную турбину. В разработанной модели учитывается только один ПТН, поскольку их работа в автоматическом режиме синхронизирована МУТ. Также предполагается, что динамические

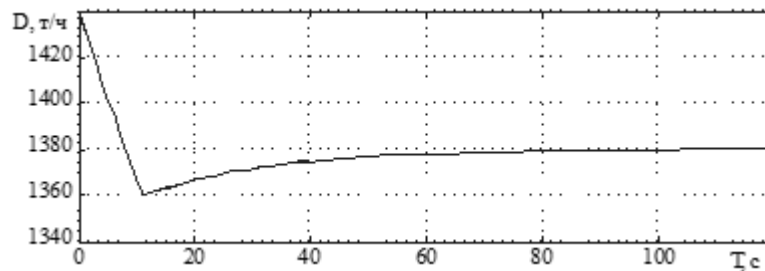


Рис. 8. Изменение расхода пара из парогенератора

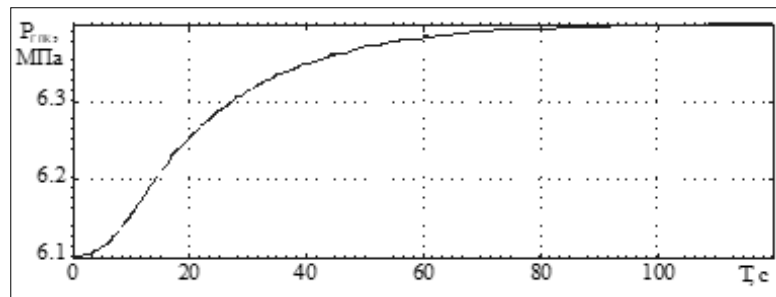


Рис. 9. Изменение давления пара в главном паровом коллекторе

свойства трубопроводов от РПК до ПГ одинаковы для всех четырёх парогенераторов. Сигнал по изменению разности температур необходим для определения задающего сигнала по тепловой мощности для регулятора производительности ПТН. Транспортное запаздывание введено в регулирующие каналы по уровню пароводяной смеси в парогенераторе и давлению питательной воды перед РПК на основании экспериментальных данных, и его проявление может быть объяснено нечувствительностью измерительных преобразователей, зоной нечувствительности регулятора и люфтами в кинематической схеме исполнительного механизма регулирующих органов.

Линеаризованные уравнения динамики элементов ММ будут получены либо аналитически, либо по экспериментальным кривым разгона на действующем оборудовании энергоблока с ВВЭР-1000. На рис. 3–5 приведены экспериментальные кривые разгона по разности температур теплоносителя первого контура, давлению и расходу пара при возмущении группой регулирующих кассет.

Основным внешним возмущением для участка питания является изменение положения регулирующих клапанов турбины (рис. 6) (РКТ), которое сопровождается резким изменением расхода пара в паропроводе (рис. 8) и инерционным изменением давления пара в ГПК и разности температур горячей и холодной петель первого контура (рис. 9, 7).

Величина возмущения составила 12% хода регулирующих клапанов, что соответствует изменению мощности энергоблока на 48 МВт. По разгонным характеристикам с учётом линейно нарастающего изменения положения регулирующих клапанов турбины аналогично тому, как были определены передаточная функция динамики ПТН и её численные значения, определяются вид и численные значения коэффициентов соответствующих передаточных функций.

**Выводы.** Полученная система дифференциальных уравнений промоделирована с помощью пакета прикладных программ “Matlab”.

Расчёт коэффициентов для полученных уравнений динамики был проведён применительно к энергоблоку с ВВЭР-1000 для номинального режима работы. Сравнение кривых разгона, полученных на модели, с имеющимися экспериментальными кривыми разгона показало хорошую адекватность модели.

С учётом определённых коэффициентов и системы матричных разностных уравнений может быть рассчитан многомерный оптимальный регулятор участка питания барабанного парогенератора ПГВ-1000. Полученная математическая модель также может быть использована для исследования переходных процессов в типовых системах регулирования уровня пароводяной смеси в парогенераторах и системы регулирования производительности турбопитательных насосов, а также выработки рекомендаций по их настройке.

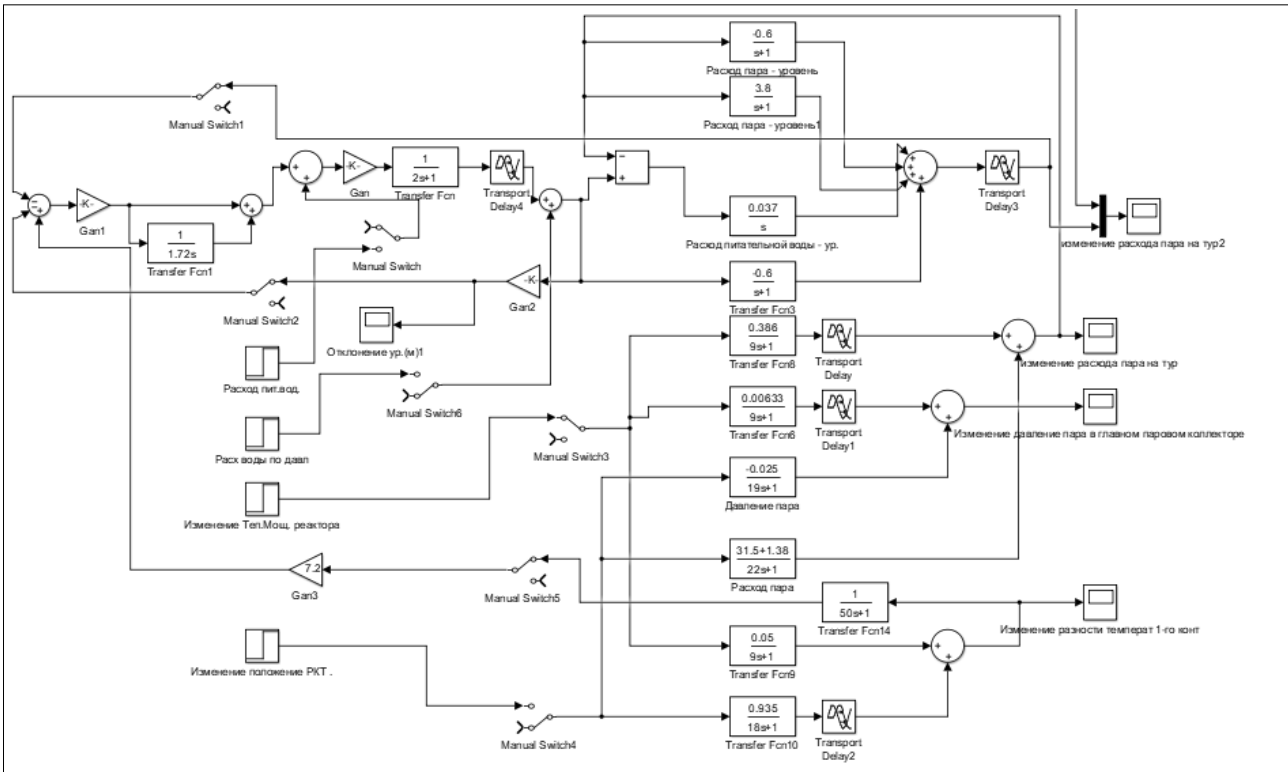


Рис. 10. Модель спроектированной АСР

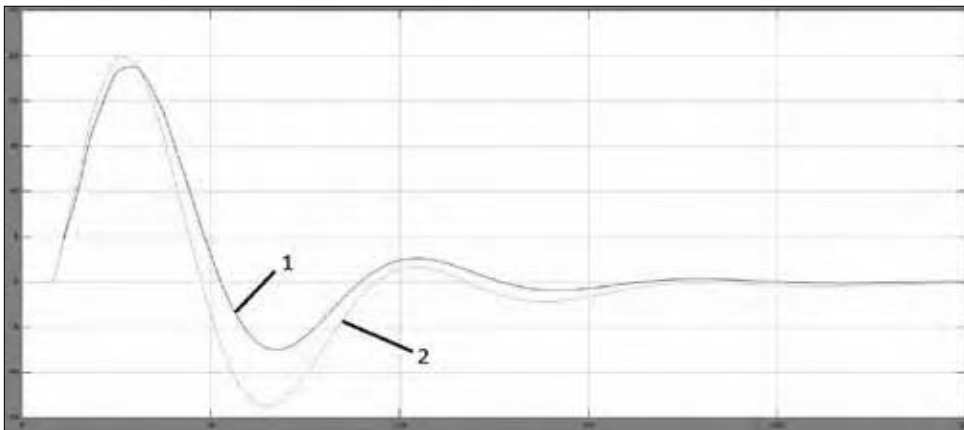


Рис. 11. Разница в регулировании с классической трёхимпульсной АСР (1)

**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. Черкаси, 1997. Т. 1. С. 20–69.
3. Тошинський В.І., Бабіченко А.К., Молчанов В.І. Технічні засоби автоматизації. Частина 2. Мікропроцесорні регулювальні та виконавчі пристрої: навчальний посібник / за ред. А.К. Бабіченка. Київ, 1977. С. 200.
4. Демченко В.А., Стопакевич А.А., Ложечников В.Ф. Оптимальный ПИ-регулятор уровня воды в парогенераторе энергоблока АЭС с реактором ВВЭР-1000. Труды Одесского политехнического университета. № 1. 2000. С. 1–3.

### **ВДОСКОНАЛЕНА СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ РІВНЯ ВОДИ З СИГНАЛОМ ПО РІЗНИЦІ ТЕМПЕРАТУР В УСТАНОВЦІ ГЕНЕРУВАННЯ ПАРИ ЕНЕРГОБЛОКА ВВЕР-1000 АЕС**

*Генерування насиченої пари в енергоблоках АЕС з ВВЕР здійснюється в парогенераторах (чотири парогенератори на енергоблок). Найважливішим регульованим параметром у ПГ АЕС, як і для котлів ТЕС, є рівень води, від точності підтримки якого залежить якість пари і надійність. Удосконалення автоматизованих систем управління технологічними процесами барабанних котлів середньої потужності і енергоблоків АЕС є найважливішим засобом підвищення їх ефективності і надійності і однією з необхідних умов підвищення якості та зниження собівартості кінцевого продукту, підвищення його конкурентоспроможності як на внутрішньому, так і на зовнішньому ринках, сприяє економічному зростанню і технічному престижу України.*

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

### **UPGRADED SYSTEM OF AUTOMATION CONTROL OF THE WATER LEVEL WITH SIGNAL OF THE TEMPERATURE DIFFERENCE IN THE INSTALLATION OF STEAM GENERATION AT POWER UNIT IN VVER-1000 OF NPP**

*The generation of saturated steam in power units of NPPs with VVER is carried out in steam generators (four steam generators per power unit). The most important regulated parameter in NGPs of NPPs, as well as for TPP boilers, is the water level, the accuracy of which depends on the quality of steam and reliability. Improvement of automated process control systems for drum boilers of average power and NPP power units is the most important means of increasing their efficiency and reliability, and one of the necessary conditions for improving the quality and reducing the cost of the final product, increasing its competitiveness both in the domestic and international markets, economic growth and technical prestige of Ukraine.*

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