

**Петік Т.В.**

Одеський національний політехнічний університет

**Лисюк Г.П.**

Одеський національний політехнічний університет

## АВТОМАТИЧНА СИСТЕМА РЕГУЛЮВАННЯ РІВНЯ ВОДИ В ПАРОГЕНЕРАТОРІ ЕНЕРГОБЛОКУ 1000МВт АТОМНОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ

*Стаття присвячена розробленню автоматичної системи регулювання рівня води в парогенераторі енергоблоку з ВВЕР-1000. Метою є модернізація автоматичної системи регулювання рівня води в парогенераторі енергоблоку з ВВЕР-1000. Це дозволить експлуатувати парогенератор та енергоблок в цілому більш ефективно. Для стабілізації рівня води в парогенераторі запропонована трьохімпульсна АСР рівня з ПІ-регулятором. Використання трьохімпульсної АСР забезпечує підвищення якості регулювання, а отже поліпшення техніко-економічних показників.*

**Ключові слова:** парогенератор, автоматична система регулювання, атомна електрична станція, регулювання рівня, ВВЕР-1000.

**Постановка проблеми.** Досвід експлуатації сучасних автоматизованих систем управління технологічними процесами (АСУ ТП) енергоблоків атомних електричних станцій, що були розроблені багато років тому, показав їх достатньо високу надійність, однак задачі з підвищення якості їх функціонування досі залишаються. Вони можуть бути вирішені, зокрема, за рахунок використання в АСУ ТП промислових комп'ютерних систем управління і удосконалення алгоритмів управління з використанням сучасних методів і принципів управління та регулювання.

Ефективне управління парогенераторами АЕС з ВВЕР в нормальних і аварійних режимах в значній мірі забезпечує динамічну стійкість системи регулювання всього енергоблоку. Найважливіший параметр, від якого залежить виконання цих функцій – рівень води в барабанному парогенераторі, який має підтримуватись на певному нормованому значенні. Підвищення рівня в барабанному парогенераторі атомної електричної станції призводить до збільшення вологості пари, зброду води в турбіну, гідроударам та пошкодженню лопаточного апарату турбіни. Зниження рівня води в парогенераторі призводить до погіршення теплообміну і збільшенню температури води першого контуру, а також до зменшення аварійного запасу води для охолодження реактора. [1, с. 103]

**Постановка завдання.** Для досягнення більш ефективного регулювання рівня води необхідна модернізація автоматичної системи регулювання рівня води в парогенераторі енергоблоку з ВВЕР-

1000. Така автоматична система регулювання рівня води в парогенераторі енергоблоку з ВВЕР-1000 дозволить експлуатувати парогенератор та енергоблок в цілому більш ефективно [2, с. 2962].

**Виклад основного матеріалу дослідження.** АЕС з ВВЕР-1000 є двоконтурною, з ректором на теплових нейтронах корпусного типу, турбіною насиченої пари. Теплова схема енергоблоків з реакторами ВВЕР-1000 чотирипетлева (чотири парогенератора, чотири ГЦН, один реактор, один компенсатор об'єму) моноблочна (один реактор – одна турбіна). Все теплотехнічне обладнання підрозділяється на реакторну, парогенераторну, турбогенераторну, конденсаційну установки і конденсатно-живильний тракт, що включає деаераційно-живильну установку.

Найбільша теплова ефективність АЕС досягається варіюванням основних визначаючих параметрів теплової схеми: температури регенеративного підігріву живильної води і схеми регенерації, тиску і температури, числа ступенів проміжного перегріву пара, типу привода допоміжних механізмів і способів включення їх в систему, характеристик конденсаційної установки та ін. [3, с. 135]. Технологічні схеми і обладнання другого контуру, що є складовою ланкою теплової схеми АЕС (рис. 1), відображають основний технологічний процес – процес вироблення електроенергії. [4, с. 467].

Перший контур АЕС – радіоактивний, другий – нерадіоактивний. Парогенератор є спільним устаткуванням для першого і другого контурів. У ньому теплова енергія, вироблена в реакторі,

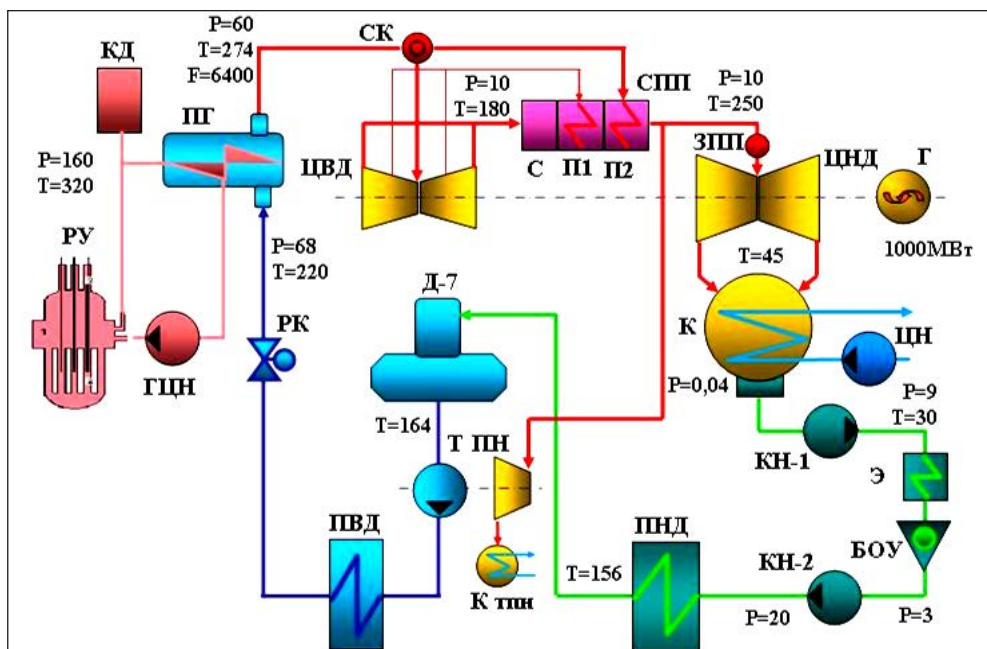


Рис. 1. Технологічна схема енергоблоків з ВВЕР-1000

від першого контуру через теплообмінні трубки передається другому контуру. Насичена пара, що виробляється в парогенераторі, по паропроводу надходить на турбіну, яка приводить в обертання генератор, що виробляє електричний струм.

Передача теплоти в парогенераторі через поверхню трубопроводу вимагає перепаду температур між теплоносієм і робочим тілом. Прагнення не допустити кипіння в реакторі вимагає створення тиску в першому контурі істотно вище тиску в другому контурі. З цієї причини параметри робочого тіла на двоконтурній АЕС з ВВЕР завжди нижче параметрів теплоносія [5, с. 177].

Парогенератор являє собою однокорпусний двоконтурний теплообмінний апарат горизонтального розташування з погрузним трубним пучком. Парогенератор служить для вироблення сухого насиченого пару з води другого контуру.

Парогенератор ПГВ-1000М забезпечує наступні основні вимоги:

- ПГ забезпечує охолодження теплоносія 1 контуру до необхідного рівня температур у всіх проектних режимах;
- схема і компоновка ГЦК (головного циркуляційного контуру) в сукупності з ПГ забезпечує охолодження теплоносія при його циркуляції;
- забезпечується резервування подачі живильної води в парогенератор по окремій лінії;
- габаритні розміри забезпечують транспортування по залізницях;

– конструкція ПГ виключає ушкодження ним іншого обладнання і трубопроводів при максимальній проектній аварії.

Теплотехнічні параметри парогенератора в номінальному режимі представлені в таблиці 1.

Таблиця 1

#### Теплотехнічні параметри парогенератора в номінальному режимі

Характеристика	Од. вим.	Значення
Теплова потужність	МВт	750±
Паропроductивність	кг/с (т/год)	408,3 (1470±)
Робочий тиск у міжтрубному просторі по другому контуру	МПа (кгс/см)	6,3(64)
Поверхня теплообміну	м	6115
Витрата теплоносія	м/год	20000
Вологість пару на виході	%	0,2
Тиск пару на виході з ПГ	кгс/см <sup>2</sup>	64±
Тиск пару на виході з ПГ, розрахунковий	кгс/см <sup>2</sup>	80
Тиск по I контуру	кгс/см <sup>2</sup>	160±
Тиск по I контуру, розрахунковий	кгс/см <sup>2</sup>	180
Температура живильної води	°	220±
Температура генерованого пару	°	278.52
Температура теплоносія на вході, розрахункова	°	320
Температура теплоносія на виході, розрахункова	°	289.7
Об'єм корпусу	м	160
Маса корпусу	кг	204720

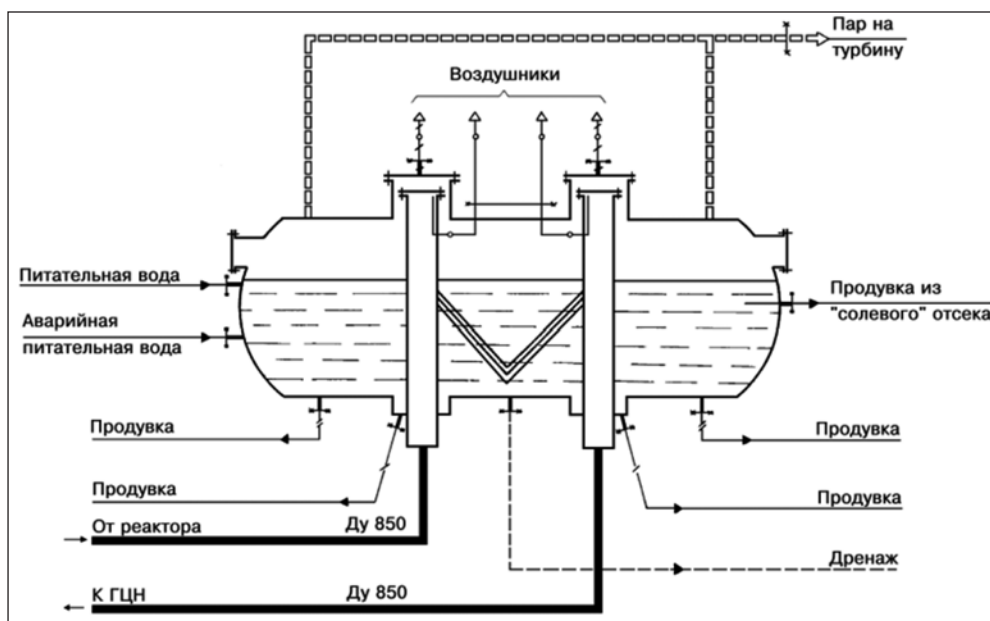


Рис. 2. Спрощена схема включення ПГ до ГЦК

Спрощена схема включення ПГ до ГЦК приведена на рисунку 2.

Регулювання живлення парогенератора зводиться до підтримки матеріального балансу між відводом пари, продувкою та подачею живильної води. Параметром, що характеризує матеріальний баланс, є рівень води в парогенераторі [6, с. 10].

До стабілізації рівня висуваються жорсткі вимоги. Для ПГВ з ВВЕР-1000 номінальний рівень складає 2450мм від внутрішньої поверхні корпусу. Точність підтримки рівня в статичних режимах складає  $\pm 50$ мм від номінального рівня, в динаміці  $\pm 150$ мм від номінального рівня (з урахуванням нечутливості регулятора). Підвищення рівня води не допускається через затоплення та порушення роботи сепараційних пристроїв (заброд води в турбіну), а зниження рівня – через оголення поверхонь нагріву. [7, с. 133]

Збурюючими впливами на рівень є:

- Зміна витрати пари;
- Зміна витрати живильної води;
- Зміна теплопідводу зі сторони першого контуру.

Регулюючим впливом є зміна положення живильного клапану, що встановлений на трубопроводі живильної води.

При зміні витрати пари, наприклад збільшенні, тиск в ПГ зменшується, відбувається додаткове закипання води, збільшення кількості і обсягу бульбашок пару і, як наслідок, підвищення рівня.

Параметрична схема математичної моделі парогенератора наведена на рисунку 3.

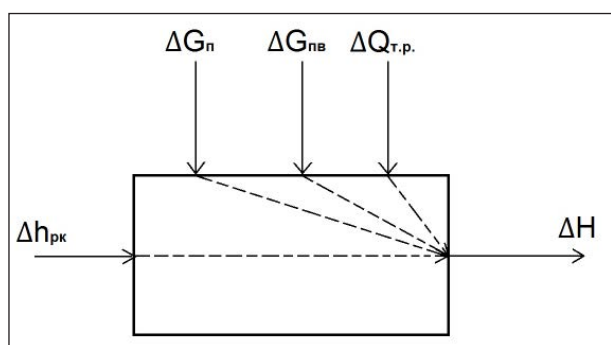


Рис. 3. Параметрична схема математичної моделі парогенератора

Передатні функції парогенератора за каналами витрати живильної води та пари:

$$\begin{cases} W(s)_1 = \frac{0.0038}{10s + 1} \\ W(s)_2 = \frac{0.000037}{s} \\ W(s)_3 = \frac{-0.0006}{13s + 1} \end{cases}$$

Для підтримання рівня використовується трьохімпульсна АСР.

Принцип роботи такої трьохімпульсної АСР (рис. 4) наступний. Сигнали по витраті пари  $G_{пл}$  і живильної води  $G_{пв}$  вводяться в регулятор з протилежними знаками. У сталому стані ці сигнали рівні, протилежні за знаком і, отже, компенсують один одного. Сигнал по рівню води в ПГ компенсується сигналом завдання. При зміні витрати пари миттєво змінюється відповідний сигнал на вході в

регулятор і останній пропорційно змінює витрату живильної води, не чекаючи зміни рівня [8, с. 22].

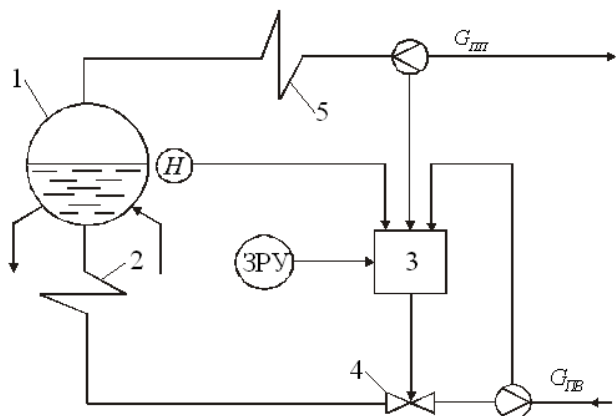


Рис. 4. Трьохімпульсна АСР живлення водою барабанного парогенератора:

- 1 – барабан;
- 2 – водяний економайзер;
- 3 – регулятор живлення;
- 4 – регулюючий клапан;
- 5 – пароперегрівач.

У регуляторі використовується ПІ-закон регулювання, проте внаслідок введення в регулятор практично безінерційного негативного зворотного зв'язку по витраті живильної води в ньому реалізується ПІ-закон регулювання (аналогія жорсткого зворотного зв'язку за положенням регулюючого органу) [9, с. 37]. Статична нерівномірність ПІ-регулятора усувається коригуючим сигналом по витраті пари.

Така АСР живлення, що поєднує принципи регулювання по відхиленню і збуренню, набула найбільшого поширення на потужних барабанних котлах [10, с. 7].

Модель трьохімпульсної АСР в Simulink приведена на рисунку 5.

За методикою Кона перевіряємо правильність налаштування аналізуючі криві розгону на рисунках 6 та 7.

В результаті перевірки впевнились, що коефіцієнти для регулятора підібрані вірно.

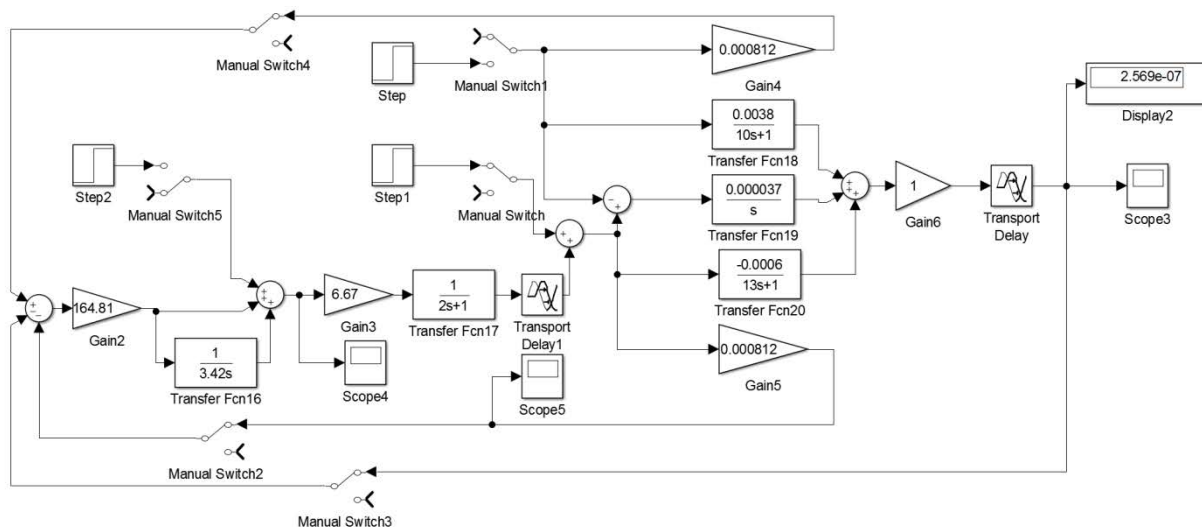


Рис. 5. Модель трьохімпульсної АСР в Simulink

Тож можна отримати перехідні процеси за рівнем води при подачі збурень по витраті живильної води (рис. 8) та по витраті пари (рис. 9).

**Висновки.** Запропонована модель парогенератора, що дозволяє дослідити перехідні процеси в об'єкті управління при збуреннях за різними каналами. Розглянута АСР рівня може бути використана не лише для контролю рівня води в

парогенераторі, а також для роботи з промисловими котлами. За результатами проведення симуляції, видно, що АСР з ПІ-регулятором забезпечує кращу якість регулювання в порівнянні з типовими АСР рівня. Таким чином використання трьохімпульсної АСР забезпечує підвищення якості регулювання, а отже поліпшення техніко-економічних показників.

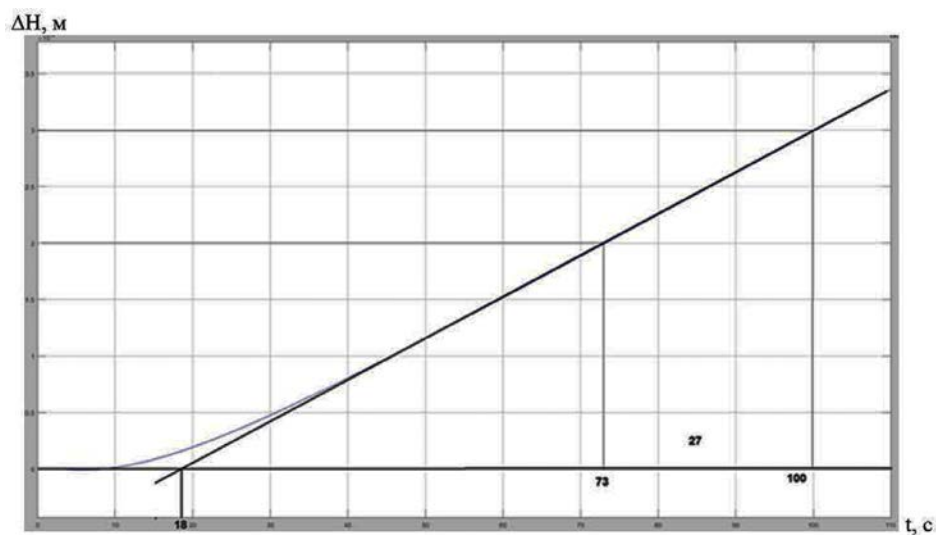


Рис. 6. Крива розгону за каналом рівня води в парогенераторі

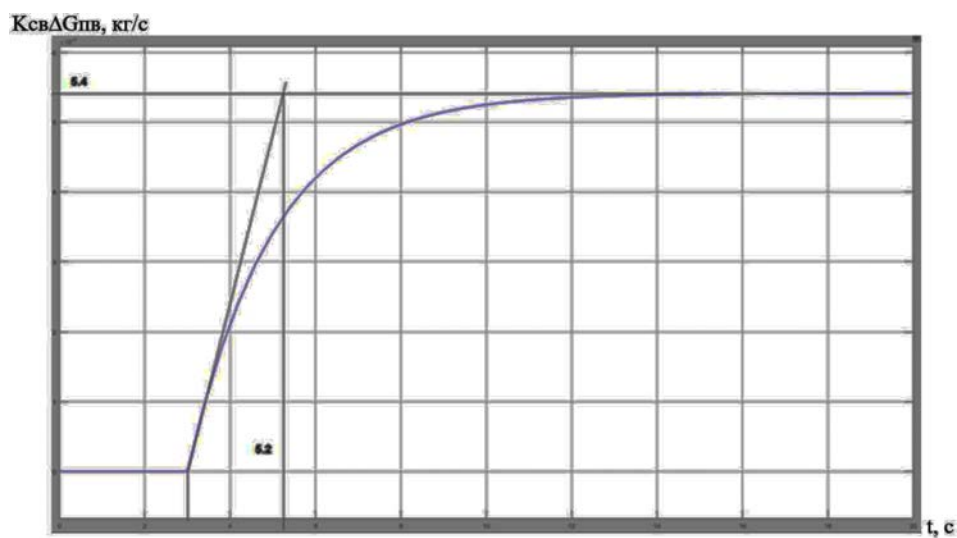


Рис. 7. Крива розгону за каналом витрати живильної води

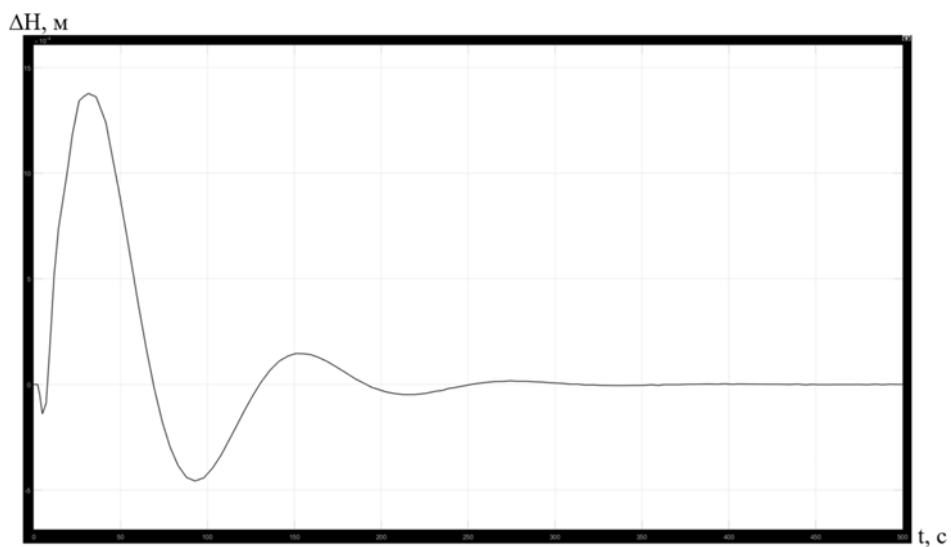


Рис. 8. Перехідні процеси за рівнем води при подачі збурення по витраті живильної води

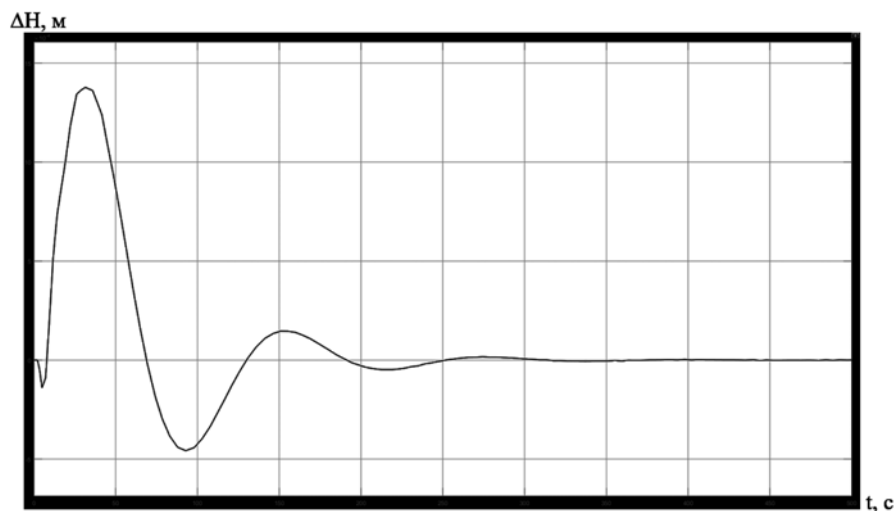


Рис. 9. Перехідні процеси за рівнем води при подачі збурення по витраті пари

#### Список літератури:

1. Beglov K.V., Tsiselskaya T.A. A model of a power unit with VVER-1000 as an object of power control/ Odes'kyi Politechnichnyi Universytet: Pratsi, 2012. № 1(38). P. 99–106.
2. Pelykh S.N., Maksimov M.V. Cladding rupture life control methods for a power-cycling WWER-1000 nuclear unit: Nuclear Engineering and Design, 2011. №241(8). P. 2956–2963.
3. Babich S.V., Davydov V.O. Objective function for municipal heat supply systems structural optimuzation: Праці Одеського політехнічного університету, 2015. № 1(45). P. 134–140.
4. Давыдов В.О., Крылов В.Н., Максимов М.В. Автоматизированная система распознавания: Искусств. Интеллект, 2002. № 4. С. 462–469.
5. Ложечников В.Ф., Михайленко В.С. Методи побудови адаптивних систем управління: Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы, 2009. № 2. С. 174–179.
6. Тодорцев Ю.К., Бундюк А.М., Ларіонова О.С. Математична модель контуру тепlopостачання когенераційної енергетичної установки: Автоматика, автоматизація, електротехнічні комплекси та системи, 2009. № 2. С. 8–11.
7. Брунеткин А.И., Максимов М.В., Бондаренко А.В. Идентификация количественного состава неизвестного газообразного горючего и его продуктов сгорания на основе измеренных технологических параметров процесса сжигания топлива / Вісник Національного технічного університету ХПІ. Сер.: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування, 2014. № 12. С. 131–141.
8. Волошкіна О.О., Плахотнюк О.А., Беглов К.В. Дослідження регулятора концентрації рідкого поглинача енергоблоку АЕС: Автоматизація технологічних і бізнес-процесів, 2015. Вып. 7, № 4. С. 18–24.
9. Бундюк А.Н., Улицкая Е.О. Разработка алгоритма для расчёта статистики когенерационной энергетической установки: Холодильная техника и технология, 2013. №3. С. 34–40.
10. Belova N.A., Lisiuk G.P. Genetic algorithms application to decide the issue of single-dimensional cutting optimization: Automation of technological and business processes, 2016. №2. Т.8. P. 4–8.

#### АВТОМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ УРОВНЯ ВОДЫ В ПАРОГЕНЕРАТОРЕ ЭНЕРГОБЛОКА 1000МВт АТОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Статья посвящена разработке автоматической системы регулирования уровня воды в парогенераторе энергоблока с ВВЭР-1000. Целью является модернизация автоматической системы регулирования уровня воды в парогенераторе энергоблока с ВВЭР-1000. Это позволит эксплуатировать парогенератор и энергоблок в целом более эффективно. Для стабилизации уровня воды в парогенераторе предложена трёхимпульсная АСР уровня с ПИ-регулятором. Использование трёхимпульсной АСР обеспечивает повышение качества регулирования, а следовательно, и улучшение технико-экономических показателей.

**Ключевые слова:** парогенератор, автоматическая система регулирования, атомная электростанция, регулирование уровня, ВВЭР-1000.

# **AUTOMATIC SYSTEM OF REGULATION OF WATER LEVEL IN THE STEAM GENERATOR OF THE 1000 MW NUCLEAR POWER PLANT**

*The article focused on the development of an automatic regulation system of the water level in the steam generator of a power unit with a WWER-1000. The aim is to upgrade the automatic water level regulation system in the steam generator of the WWER-1000 power unit. That will allow the operation of the steam generator and power unit as a whole more efficiently. For the stabilization of the water level in the steam generator proposed the three-pulse automatic regulation system of the water level with the PI regulator. The use of the three-pulse automatic regulation system ensures improved quality of regulation, and hence improved technical and economic performance.*

**Key words:** *steam generator; automatic regulation system, atomic power station, level regulation, WWER-1000.*