

**Петік Т.В.**

Одеський національний політехнічний університет

**Давидов В.О.**

Одеський національний політехнічний університет

## РОЗРОБКА МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ ЗМІНИ РІВНЯ ВОДИ В ПАРОГЕНЕРАТОРІ ЕНЕРГОБЛОКУ 1000 МВт АТОМНОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ

*Стаття присвячена дослідженню взаємного впливу зміни рівня води в парогенераторі кожної з чотирьох петель енергоблоку атомної електричної станції з ВВЕР-1000. Метою роботи є розробка моделі процесу зміни рівня води в парогенераторах атомних електричних станцій із реакторами ВВЕР-1000 і взаємодії між парогенераторами, а також модернізація автоматичної системи регулювання рівня води в парогенераторі енергоблоку атомної електричної станції з ВВЕР-1000.*

*Рівень води в парогенераторі залежить від витрати живильної води, витрати згенерованої пари та кількості теплоти, підведеної з боку першого контуру енергоблоку атомної електричної станції з ВВЕР-1000. Підтримання рівня води в парогенераторі здійснюється шляхом зміни витрати живильної води другого контуру. Управління рівнем води в парогенераторі подачею керуючого впливу на регулюючу засувку витрати живильної води на конкретний парогенератор не може забезпечити необхідну точність без належного алгоритму керування. Головною причиною цього є те, що живильна вода на парогенератори подається з одного живильного тракту і зміна витрати води на один парогенератор призводить до зміни витрати на усі інші парогенератори.*

*У статті парогенератор енергоблоку атомної електричної станції з ВВЕР-1000 досліджується не лише як цільна система, а й як частина більш складної системи. Для дослідження факторів, які впливають на рівень води в парогенераторі, розглядається група парогенераторів чотирьох циркуляційних петель першого контуру енергоблоку атомної електричної станції з ВВЕР-1000 як цільна система.*

*Розробка моделі взаємних впливів зміни рівня води в парогенераторах дозволить удосконалити автоматичну систему регулювання рівня води в парогенераторі енергоблоку з ВВЕР-1000, забезпечити підвищення якості регулювання й поліпшення техніко-економічних показників. Зокрема, дослідження цього питання дозволить експлуатувати парогенератор та енергоблок більш ефективно.*

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

**Постановка проблеми.** Автоматизовані системи управління технологічними процесами (далі – АСУ ТП), які використовуються на енергоблоках атомних електричних станцій (далі – АЕС), за багаторічну експлуатацію довели свою надійність, проте існує потреба в підвищенні якості їх функціонування, а отже й у модернізації. Цю потребу можна задовольнити за рахунок удосконалення принципів і алгоритмів управління та регулювання.

Парогенератори (ПГ) енергоблоків із ВВЕР-1000 належать одразу до двох контурів, тому ефективність управління парогенераторами АЕС із ВВЕР-1000 значно впливає на ефективність процесу видобутку електроенергії загалом. Найважливіший параметр, який підлягає регулюванню, це рівень води в парогенераторі.

Підвищення рівня в ПГ АЕС недопустиме, бо призводить до збільшення вологості пари, заброду води в турбіну, гідроударів і пошкодження лопаточного апарату турбіни. Зниження рівня води в ПГ викликає оголення поверхонь теплообміну, а отже погіршення теплообміну і збільшення температури води першого контуру [1, с. 100].

Підтримання рівня води в парогенераторі на номінальному значенні – це важлива задача для безперебійної роботи будь-якої АЕС. Відомо, що рівень води в парогенераторі залежить від витрати живильної води, витрати згенерованої пари та кількості підведеної з боку першого контуру теплоти, а підтримання рівня здійснюється шляхом зміни витрати живильної води другого контуру. Управління рівнем води в парогенераторі подачею керуючого впливу на регулюючу засувку

витрати живильної води на конкретний парогенератор не може бути абсолютно точним без належного алгоритму керування. Відбувається це тому, що живильна вода на парогенератори подається з одного живильного тракту, і зміна витрати води на один парогенератор призводить до зміни витрати на всі інші.

**Мета статті.** Для досягнення більш ефективного регулювання рівня води необхідна модернізація автоматичної системи регулювання (АСР) рівня води в парогенераторі енергоблоку з ВВЕР-1000. Необхідно дослідити парогенератор не лише як цільну систему, а й як частину більш складної системи. Тобто для дослідження факторів, які впливають на рівень води в парогенераторі, слід розглядати групу парогенераторів чотирьох циркуляційних петель першого контуру енергоблоку з ВВЕР-1000 як цільну систему. Розробка моделі взаємних впливів зміни рівня води в парогенераторах дозволить вдосконалити АСР рівня води в ПГ енергоблоку з ВВЕР-1000, що в свою чергу дасть можливість експлуатувати ПГ та енергоблок більш ефективно.

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

Найбільша теплова ефективність АЕС досягається варіюванням основних параметрів тепло-

вої схеми: температури регенеративного підігріву живильної води і схеми регенерації, тиску і температури, числа ступенів проміжного перегріву пари, типу привода допоміжних механізмів і способів включення їх у систему, характеристик конденсаційної установки. Технологічні схеми і обладнання другого контуру, що є складниками теплової схеми АЕС (рис. 1), відображають основний технологічний процес – процес вироблення електроенергії.

Перший контур АЕС радіоактивний, другий – нерадіоактивний. Парогенератор є спільним устаткуванням для першого і другого контурів. У ньому теплова енергія, вироблена в реакторі, від першого контуру через теплообмінні трубки передається другому контуру. Насичена пара, яка виробляється в ПГ, по паропроводу надходить на турбіну, яка приводить в обертання генератор, що виробляє електричний струм [2, с. 221].

Тип парогенератора – горизонтальний, однокорпусний, із зануреною поверхнею теплообміну з горизонтально розташованих труб, з убудованими паросепараторними пристроями, системою роздачі живильної води, паровим колектором, із зануреним дірчатим листом, системою роздачі аварійної живильної води. Спрощена схема включення парогенератора до головного циркуляційного контуру наведена на рисунку 2.

Нагрітий у реакторі теплоносієм першого контуру по «гарячій» нитці головного циркуляційного трубопроводу Ду850 подається в «гарячий» колектор парогенератора, звідки роздається по «U»-подібним змійовикам. Проходячи всередині змійовиків, теплоносієм віддає тепло котельній воді другого контуру ПГ і, охолоджуючись, виходить у «холодний» колектор парогенератора,

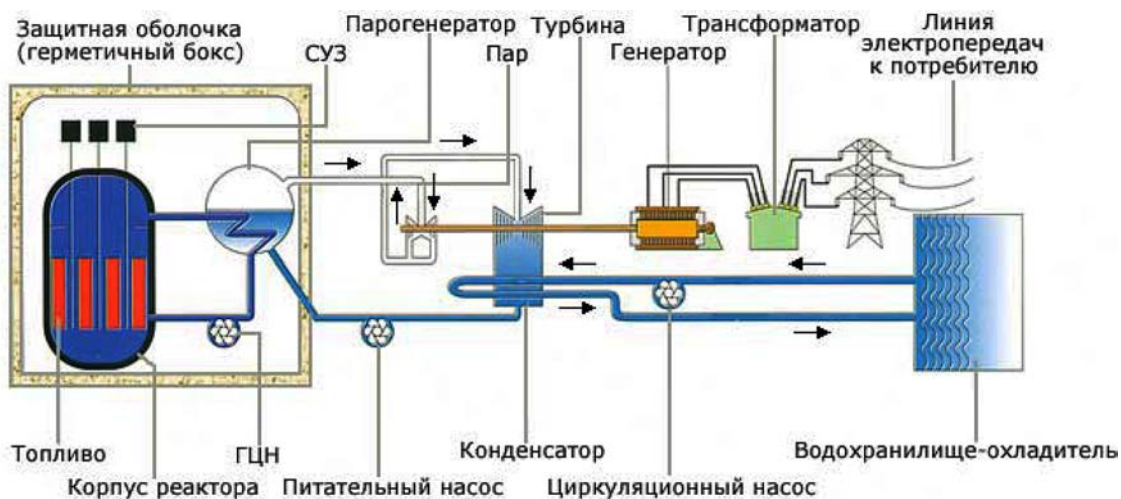


Рис. 1. Технологічна схема енергоблоку з ВВЕР-1000

Теплотехнічні параметри парогенератора в номінальному режимі

Характеристика	Од. вим.	Значення
Теплова потужність	МВт	750±
Паропродуктивність	кг/с (т/год)	408.3 (1470±)
Робочий тиск у міжтрубному просторі по другому контуру	МПа (кгс/см)	6.3(64)
Поверхня теплообміну	м <sup>2</sup>	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	°	278.5±
Температура теплоносія на вході, розрахункова	С	320
Температура теплоносія на виході, розрахункова	С	289.7
Об'єм корпусу	м <sup>3</sup>	160
Маса корпусу	кг	204720
Середній тепловий потік	ккал/м <sup>2</sup> год	106600
Максимальний тепловий потік	ккал/м <sup>2</sup> год	195000
Коефіцієнт теплопередачі (середній) з урахуванням відкладень	ккал/м <sup>2</sup> год°С	4657.7
Коефіцієнт теплопередачі (середній) без урахування відкладень	ккал/м <sup>2</sup> год°С	5185
Ємність корпусу	л	124600
Ємність трубної частини	л	23400

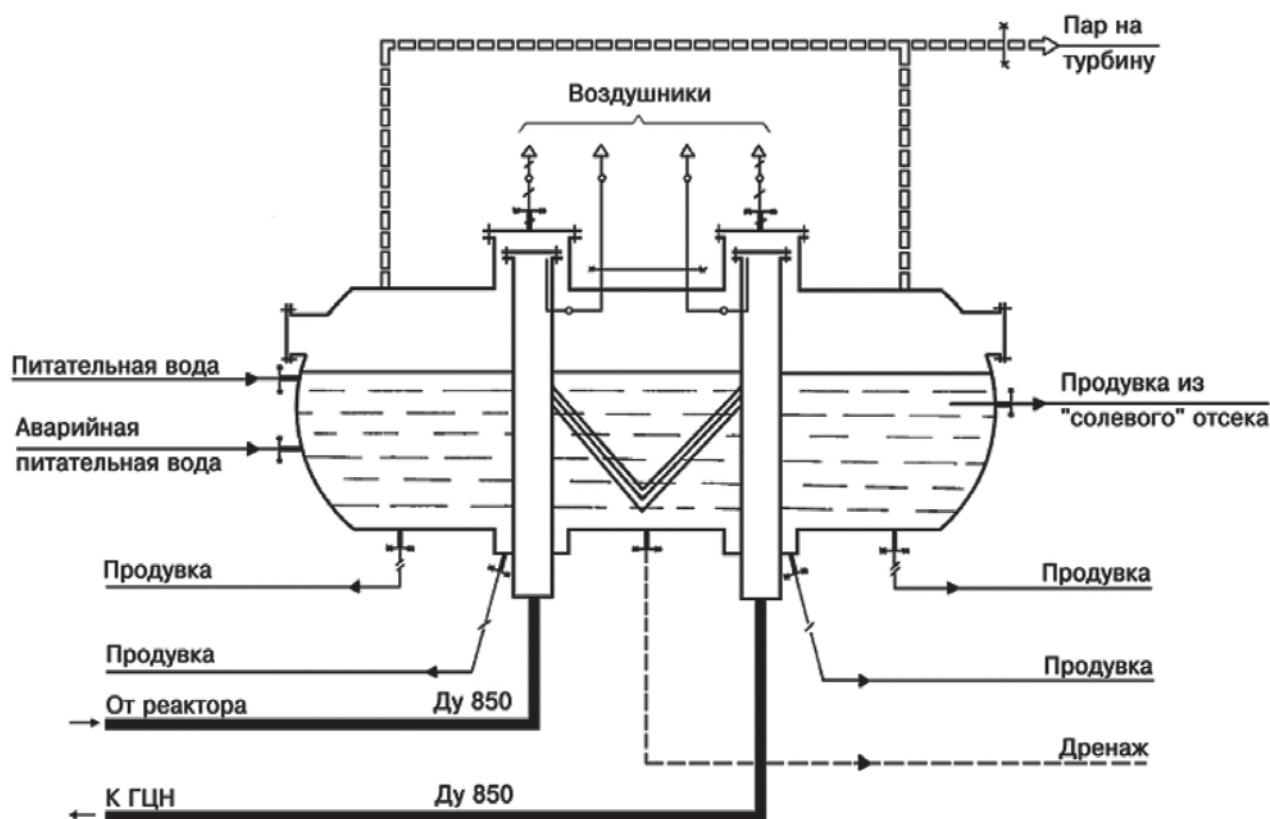


Рис. 2. Спрощена схема включення ПГ до ГЦК

подається в «холодну» нитку головного циркуляційного трубопроводу Ду850 на вхід головного циркуляційного насоса. Живильна вода по трубопроводу Ду400 подається в парогенератор, звідки через пристрій роздачі надходить на гарячу сторону теплообмінного пучка, чим досягається часткове вирівнювання парового навантаження по перерізу парогенератора за рахунок конденсації частини пари. Циркуляція води котла в парогенераторі природна. Пар, виходячи з дзеркала випаровування, осушується в паровому об'ємі за рахунок гравітаційних сил і надходить у жалюзійний сепаратор, де додатково осушується до необхідного ступеня. Осушена пара виходить із парогенератора через 10 парових патрубків у колектор, звідки пара по паропроводах подається на турбіну.

Теплотехнічні параметри парогенератора в номінальному режимі наведені в таблиці 1.

Передача теплоти в ПГ через поверхню трубопроводу вимагає перепаду температур між теплоносієм і робочим тілом. Прагнення не допустити кипіння в реакторі вимагає створення тиску в першому контурі істотно вищого, ніж у другому контурі. З цієї причини параметри робочого тіла на двоконтурній АЕС із ВВЕР завжди нижчі за параметри теплоносія.

Регулювання живлення парогенератора зводиться до підтримки матеріального балансу між відводом пари, продувкою, подачею живильної води та енергетичного балансу між кількістю енергії, яка надходить з боку першого контуру та витрачається на утворення пари, та внутрішніх втрат [3, с. 10]. Параметром, який характеризує матеріальний баланс, є рівень води в парогенераторі.

До стабілізації рівня висуваються жорсткі вимоги. Для ПГВ із ВВЕР-1000 номінальний рівень складає 2450 мм 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.

Збурюючими впливами на рівень є:

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

Регулюючим впливом є зміна положення живильного клапана, встановленого на трубопроводі живильної води [4, с. 9].

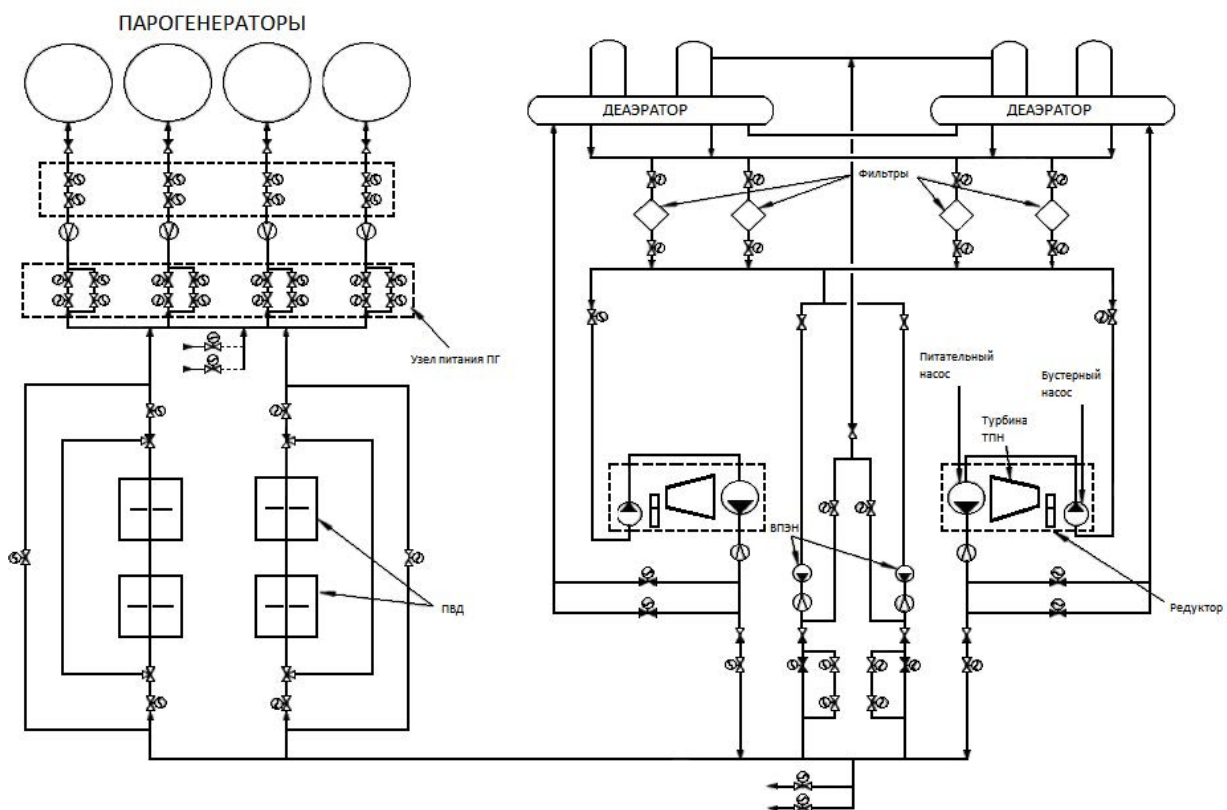


Рис. 3. Система живильної води енергоблоку з реактором ВВЕР-1000

Система живильної води (рис. 3) призначена для надійної подачі необхідної кількості живильної води в ПГ із деаераторів підвищеного тиску через трубні системи ПВД.

Система живильної води складається з двох деаераторів підвищеного тиску; чотирьох фільтрів живильної води (3 з них постійно в роботі, 1 – у резерві); двох головних живильних насосів (далі – ТПН) і двох допоміжних живильних електронасосів (далі – ВПЕН); системи регенерації високого тиску (дві групи по два ПВД в кожній); вузла живлення, який складається з індивідуальних регуляторів рівня води в ПГ з основними лініями подачі живильної води в ПГ і байпасними лініями подачі живильної води в ПГ із відсікаючими засувками на цих лініях; трубопроводів та арматури.

Для блоків ВВЕР-1000 повного резервування живильних насосів не передбачено. Обидва встановлених живильних насоси працюють на загальний живильний колектор. При виході з ладу одного з них на 40% знижується потужність блоку. Відсутність резервування пояснюється вибором для цих насосів турбоприводу. Багатоступінчасті турбіни вимагають прогріву перед пуском і тому не можуть використовуватися як резервні.

Математична модель.

Рівняння енергетичного балансу:

$$Q_{np\ i} = G_{1\kappa\ i} * Cp * (t_2 - t_{x\ i})$$

$$Q_{cm\ i} = G_{n\ i} * i_n$$

$$Q_i = K * R_i * S * (t_2 + t_{x\ i}) / 2 - t_{нас}$$

де:

$Q_{np\ i}$  – тепло від реактора;

$G_{1\kappa\ i}$  – витрата теплоносія першого контуру;

$t_2$  – температура гарячої нитки теплоносія першого контуру;

$t_{x\ i}$  – температура холодної нитки теплоносія першого контуру;

$Cp$  – теплоємність;

$Q_{cm\ i}$  – тепло до турбіни;

$G_{n\ i}$  – витрата пари;

$i_n$  – ентальпія пари;

$Q_i$  – теплопередача через стінку;

$S$  – площа теплообміну;

$R_i$  – індивідуальний механічний опір парогенератора.

$$R_i = r_{1\ i} + r_{2\ i},$$

де:

$r_{1\ i}$  – статичний опір;

$r_{2\ i}$  – динамічний опір;

$K$  – коефіцієнт теплопередачі;

$t_{нас}$  – температура насичення.

Рівняння матеріального балансу:

$$1) m_{n2\ i} = \rho * V_i - \text{маса води в парогенераторі,}$$

де:

$\rho$  – густина води;

$V$  – об'єм води.

$$2) R = 1 / (1 / R_1 + 1 / R_2 + 1 / R_3 + 1 / R_4) - \text{загальний опір,}$$

$$3) \Delta P = G_{зас} * R - \text{перепад тисків до і після парогенератора,}$$

де:

$G_{зас}$  – витрата на загальний колектор живильної води

$$4) G_i = dP / R_i - \text{витрата води на конкретний парогенератор}$$

$$5) t_{нов\ i} = (m_{n2\ i} * t_{n2\ i} + m_{ex\ i} * t_{ex\ i}) - \text{нова температура води в ПГ}$$

$$6) Q_{кум\ i} = (m_{n2\ i} + m_{ex\ i}) * Cp * (t_{кум} - t_{нов\ i}) - \text{теплота, яка витрачається на закипання води}$$

$$7) Q_{зали} = Q - Q_{кум\ i} - r - \text{теплота, яка залишилася}$$

$$8) m_{n\ i} = Q_{зали} / r - \text{маса утвореної пари}$$

де:

$r$  – питома теплота пароутворення.

$$9) m_{n\ i} = m_{n2\ i} + m_{ex\ i} * \lambda c - m_{n\ i} - \text{нова маса води в ПГ}$$

$$10) H_i = m_{n\ i} / (\rho * V / h) - \text{рівень води в парогенераторі,}$$

де:

$h$  – висота парогенератора;

$V$  – об'єм води другого контуру до повного заповнення ПГ.

$$11) N_{\rho\ i} = m_{n\ i} * H_{\rho\ i} * \eta_m^m * \eta_e - \text{нова маса пари в перерахунку на потужність,}$$

де:

$H_{\rho}$  – дійсний теплоперепад;

$\eta^m$  – механічний ККД турбіни;

$\eta_e$  – ККД електричного генератора.

13) Електрична потужність порівнюється із заданою, здійснюється регулюючий вплив на засувку, що контролює подачу живильної води. Якщо електрична потужність більша заданої, то зменшується подача живильної води до спільного колектору і навпаки. Необхідно зважати й на інші умови:

– якщо рівень води в ПГ вище номінального, то необхідно зменшити витрату живильної води на цей ПГ, якщо рівень води нижче номінального – збільшити витрату живильної води;

– якщо рівень води у трьох ПГ вищий номінального, то необхідно зменшити потужність турбін ТПНів, якщо нижчий – збільшити, змінивши витрату води на спільний колектор живильної води.

**Висновки.** Запропонована модель дозволяє відстежувати підтримання енергетичного та

матеріального балансу в парогенераторі, контролювати не лише рівень води в парогенераторах, але й потужність турбіни. Це досягається шляхом регулювання положення засувки живильної води на спільний колектор або на кожен із парогене-

раторів. Така модель може бути використана для розробки алгоритму для АСР рівня води, що може використовуватися не лише з парогенераторами АЕС, а також для роботи із промисловими котлами.

#### 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 Politechnichniy Universytet : Pratsi*, 2012. № 1(38). P. 99–106.
2. Войтович О.П. Теоретичні і методичні засади формування технологічної компетентності майбутніх екологів у процесі фахової підготовки : дис. ... канд. пед. наук: 13.00.02, 13.00.04. Київ, 2018. 457 с.
3. Тодорцев Ю.К., Бундюк А.М., Ларіонова О.С. Математична модель контура теплопостачання когенераційної енергетичної установки: *Автоматика, автоматизація, електротехнічні комплекси та системи*, 2009. № 2. С. 8–11.
4. Петік Т.В., Лисюк Г.П. Автоматична система регулювання рівня води в парогенераторі енергоблоку 1000 МВт атомної електричної станції. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2019. Том 30(69). № 3. Ч. 2. С. 7–13.

#### **Petik T.V., Davydov V.O. DEVELOPING OF A MODEL OF THE PROCESS OF WATER LEVEL CHANGE IN THE STEAM GENERATOR OF THE 1000 MW NUCLEAR POWER PLANT**

*The article is devoted to the study of the mutual influence of the change in the water level in the steam generator of each of the four loops of the nuclear power plant with WWER-1000. The purpose is to develop a model of the process of changing of the water level in the steam generators of the nuclear power plant with WWER-1000 and the interaction between the steam generators, as well as to modernize the automatic system of regulation of the water level in the steam generator of the nuclear power plant with WWER-1000.*

*The water level in the steam generator depends on the flow of feedwater, the flow of generated steam and the amount of heat supplied by the first circuit of the power unit of the nuclear power plant with WWER-1000. Maintaining the water level in the steam generator is done by changing the flow rate of the feed water of second circuit. Steering the water level in the steam generator by supplying a control effect on the control valve of the feed water flow to a particular steam generator cannot provide the required accuracy without a proper control algorithm. The main reason for this is that the feed water for the steam generators is supplied from one feed path and the change in the water flow rate for one steam generator leads to a change in the flow rate for all others steam generators.*

*In the article, the steam generator of the nuclear power plant with WWER-1000 is investigated not only as a complete system but also as part of a more complex system. To study the factors affecting the water level in a steam generator, is considering a group of steam generators of four circulation loops of the first circuit of the power unit of the nuclear power plant with WWER-1000 as a whole system.*

*Developing of a model of reciprocal effects of changes in water level in steam generators will allow to improve the automatic system of regulation of water level in the steam generator of the nuclear power plant with WWER-1000 and thus to provide quality improvement of regulation and improvement of technical and economic indicators. In particular, the study of this issue will allow to operate the steam generator and the power unit as a whole more effectively.*

**Key words:** *steam generator, automatic control system, nuclear power plant, level control, WWER-1000.*