

Нікулін Д.С.

Одеський національний політехнічний університет

## ДОСЛІДЖЕННЯ ДІЛЯНКИ ЖИВЛЕННЯ ПАРОГЕНЕРАТОРА ЕНЕРГОБЛОКУ АЕС З РЕАКТОРОМ ВВЕР-1000

Електроенергія – невід’ємна частина сучасності. Використання електроенергії з часом неухильно зростає як у промисловості, так і в побуті громадян. Нині в Україні споживається більш як 150 мільярдів кіловатт-годин електроенергії на рік. Електроенергія повинна потрапляти до споживачів безперервно, незалежно від погодних умов та інших обставин. Незважаючи на активний пошук альтернативних джерел енергії, основна частина електроенергії в Україні та світі виробляється електростанціями на органічному паливі, серед яких вигідно виділяються атомні електростанції, які мають високу потужність і не забруднюють навколишнє середовище [1, с. 99–102].

В Україні на тепер функціонує чотири атомні електростанції. Електроенергія, яку вони виробляють, використовується споживачами по всій країні та навіть експортується за кордон. Принцип роботи атомних електростанцій полягає в перетворенні енергії ділення атомних ядер в електричну енергію шляхом підігрівання живильної води, яка, випаровуючись, передає свою енергію, задаючи оберти генератору електроенергії.

Ділянка живлення парогенератора, який є об’єктом розгляду цієї статті, має важливе значення для АЕС, оскільки вона впливає на витрату пари головного циркуляційного насоса (далі – ГЦН) і на потужність енергоблоку. Ділянка живлення парогенератора поділяється на дві частини: автоматичну систему регулювання живлення парогенератора, завданням якої є підтримка матеріального балансу між відводом пари, продувкою і подачею живильної води, і автоматичну систему регулювання продуктивності турбоживильних насосів (далі – ТЖН), які змінюють витрату живильної води шляхом зміни його оборотів. Управління цими системами здійснюється за допомогою цифрових ПП-регуляторів, які є невід’ємною частиною програмно-технічного комплексу турбінного відділення.

**Ключові слова:** АЕС, АСР, турбоживильний насос, парогенератор, вода, тиск.

**Постановка проблеми.** Ділянки живлення енергоблоку АЕС з реактором типу ВВЕР-1000 є найрозповсюдженішими в Україні, впливають на витрату пари на вході до головного циркуляційного насоса. Дослідження роботи цієї ділянки дозволить створити її математичну модель, на основі якої може бути створена сучасна автоматизована система регулювання подачі живильної води, що позитивно відобразиться на ефективності роботи цієї системи і на ККД всього енергоблоку.

**Постановка завдання.** Метою роботи є дослідження ділянки живлення енергоблоку АЕС з реактором ВВЕР-1000 і розробка її математичної моделі, яку можна використовувати для реалізації автоматизованої системи регулювання турбоживильних насосів.

**Виклад основного матеріалу дослідження.**

1. ОПИС ДОСЛІДЖУВАНОЇ ДІЛЯНКИ. Реактори типу ВВЕР використовують для будівництва двоконтурних АЕС. Як випливає з назви, така АЕС (Рисунок 1) складається з двох контурів. Перший контур розташований у реакторному

відділенні. Він включає реактор типу ВВЕР, через який за допомогою ГЦН прокачується вода під тиском 15,7 МПа (160 ат). На вході в реактор вода має температуру 289°C, на виході – 322°C. При тиску в 160 ат вода може закипіти тільки за температури 346°C. Тому в першому контурі двоконтурної АЕС завжди циркулює тільки вода без появи пари.

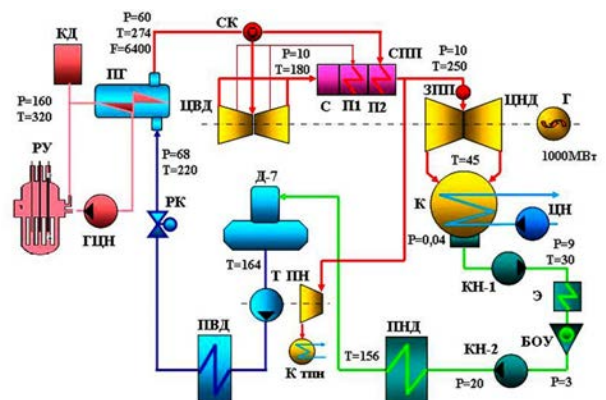


Рис. 1. Схема двоконтурної АЕС з реактором типу ВВЕР-1000

З ядерного реактора вода з температурою 322°C надходить у парогенератор. Парогенератор – це горизонтальна циліндрична посудина (барабан), частково заповнена живильною водою другого контуру; над водою є паровий простір. У воду занурені численні труби парогенератора (далі – ПГ), в які надходить вода з ядерного реактора. За допомогою живильного насоса (далі – ЖН) і відповідного вибору турбіни в парогенераторі створюється тиск істотно менше, ніж у першому контурі (для реактора ВВЕР-1000 і турбіни потужністю 1000 МВт це тиск свіжої пари  $p_0 = 60$  ат).

Тому вже при нагріванні до 275°C вода в парогенераторі закипає внаслідок нагрівання її теплоносієм, який має температуру 322°C. Таким чином у парогенераторі, який є сполучною ланкою першого і другого контурів (але розташованим у реакторному відділенні), генерується сухий насичений пар із тиском  $p_0 = 60$  ат і температурою  $t_0 = 275^\circ\text{C}$  (свіжий пар). Цей пар – волога, проте його вологість мала (0,5%). Перша особливість АЕС – низькі початкові параметри і вологий пар на вході в турбіну. Цей пар спрямовується в ЦВТ парової турбіни. Тут він розширюється до тиску приблизно 1 МПа (10 ат). Вибір цього тиску зумовлений тим, що вже при такому тиску вологість пари досягає 10-12%, а краплі вологи, які рухаються з великою швидкістю, призводять до інтенсивної ерозії і розмивів деталей проточної частини парової турбіни.

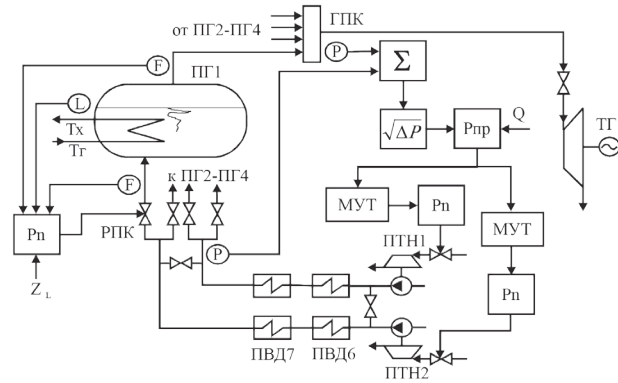
З ЦВТ пар спрямовується в сепаратор-пароперегрівач (далі – СПП). У сепараторі від пару відділяється волога, і він надходить у пароперегрівач, де його параметри доводяться до значень 10 ат (250°C). Таким чином пар на виході з СПП є перегрітим, а ці параметри обрані такими, щоб отримати допустиму вологість в кінці турбіни, де загроза ерозії ще більша, ніж за ЦВТ. Пар із зазначеними параметрами надходить у ЦНТ (в енергоблоці 1000 МВт три однакових ЦНТ. На Рисунку 1 показаний тільки один). Розширившись у ЦНТ, пар надходить у конденсатор, а з нього – в конденсатно-живильний тракт звичайної ТЕС.

**2. РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ. Принципова схема АСР живлення ПГ і продуктивності ТЖН зображена на Рисунку 2.**

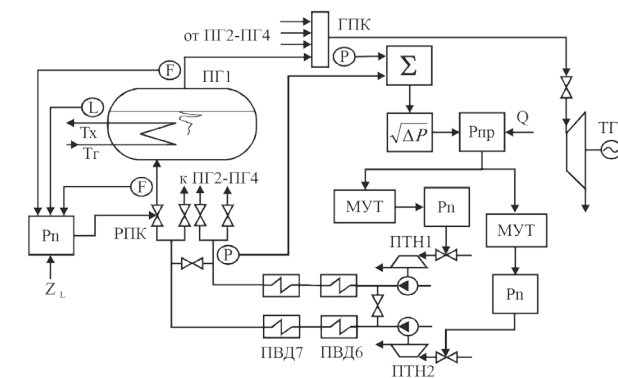
Регулятор продуктивності  $\Delta P_{пр}$  пропорційно-інтегральної дії одержує сигнал, пропорційний кореневі квадратному з  $\Delta P$ . В якості задаючого сигналу на його вхід передається сигнал  $Q$  теплової потужності петлі. Регулятор впливає на меха-

нізм керування турбіною (далі – МКТ) регулятора швидкості обертання  $P_n$  кожного з ТЖН, що приводить до зміни витрати пари на приводну турбіну, швидкості її обертання та продуктивності насоса.

Як сигнал завдання  $Q$  використовується максимальний сигнал із сигналів чотирьох циркуляційних петель першого контуру енергоблоку. В АСР живлення ПГ сигнали за витратою пари та живильної води вводяться в регулятор із протилежними знаками й компенсують один одного. Сигнал за рівнем води в ПГ компенсується сигналом завдання. В цій схемі реалізується пропорційний (П) закон регулювання з інваріантністю по збурюванню витратою пари. Для розглянутих АСР відповідно до принципової схеми автоматичного регулювання (Рисунок 2) розроблена структурна схема ділянки живлення барабаних парогенераторів, зображена на Рисунку 3.



**Рис. 2. Принципова схема автоматичного регулювання продуктивності ТЖН і живлення ПГ**



**Рис. 3. Структурна схема ділянки живлення парогенераторів АЕС із реактором ВВЕР**

В ній виділені такі структурні елементи, які відображають властивості реальних конструктивних елементів схеми ділянки живлення барабаних парогенераторів: парогенератори ПГ 1, 2, 3, 4, що враховують динаміку зміни рівня

пароводяної суміші в парогенераторі ДН при зміні витрати живильної води  $\Delta W_{пг}$  та пари  $\Delta D$ , живильний трубопровід, який є сполучним елементом ділянки живлення та враховує динаміку зміни витрати живильної води в результаті зміни положення РЖК ( $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ ) та динаміку зміни тиску живильної води перед регулюючими живильними клапанами в результаті зміни продуктивності ТЖН, живильний турбонасос, який визначає динаміку зміни подачі живильної води  $\mathcal{O}W_{пгн}$  в парогенераторі через живильний трубопровід і зміну тиску живильної води  $\mathcal{O}P_{пгн}$  на виході ТЖН, в результаті зміни положення регулювальних клапанів  $\alpha_3$ , приводної турбіни ТЖН, головний паропровід від парогенераторів до головного парового колектора та трубопровід першого контуру.

Внутрішнім збурюванням для ділянки живлення є зміна теплової потужності енергоблоку  $\mathcal{O}N$ , що приводить до зміни кількості пари, яка генерується в парогенераторах, і зміни витрати тиску  $\mathcal{O}P$  пари в головному паропроводі. Зміна теплової потужності характеризується зміною різниці температур  $\mathcal{O}T$  гарячої й холодної петель першого контуру.

Як зовнішнє збурювання прийнята зміна положення регулювальних клапанів турбіни  $\mathcal{O}S_{ркт}$ , що супроводжується різкою зміною витрати пари через паропровід і зміною тиску пари в ГПК. Зміна витрати пари через паропровід призводить до порушення матеріального балансу між живильною водою, яка надходить у ПГ, і паром, що відбирається з нього. Регулятор рівня, прагнучи відновити матеріальний баланс, змінює витрату живильної води, що приводить до зміни умов теплообміну між пароводяною сумішшю в парогенераторі і теплообмінним пучком першого контуру. В результаті цього відбувається зміна різниці температур теплоносія першого контуру. Оскільки процес зміни різниці температур має більшу інерційність, ніж швидкість зміни живильної води, то при розробці математичної моделі ділянки живлення для спрощення розрахунку і зменшення розмірності математичної моделі вплив витрати живильної води на різницю температур теплоносія першого контуру і процес генерації пари буде враховуватися побічно через канали внутрішнього і зовнішнього збурювання.

В розробленій моделі враховується тільки один ТЖН, оскільки їхня робота в автоматичному режимі синхронізована МКТ. Також передбачається, що динамічні властивості трубопроводів від РЖК до ПГ однакові для всіх чотирьох парогене-

раторів. Структурна схема математичної моделі матиме такий вигляд:

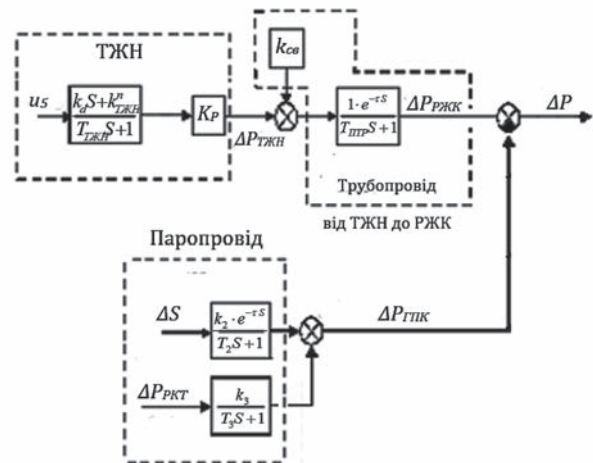


Рис. 4. Структурна схема математичної моделі ділянки живлення

Більш детально передатні функції, які лежать в основі цієї математичної моделі, виглядають так:

– по каналу «електрична потужність – тиск пари»

$$W_{ГПК}(S) = \frac{k_2 \cdot e^{-\tau \cdot S}}{T_2 S + 1}, \text{ де } k_2 = 0.00633 \frac{\text{МПа}}{\text{МВт}}, T_2 = 9 \text{ с}, \tau = 4 \text{ с};$$

– по каналу «положення РЖК – тиск пари»

$$W_{ГПК}(S) = \frac{k_3}{T_3 S + 1}, \text{ де } k_3 = -0.025 \frac{\text{МПа}}{\%}, T_3 = 19 \text{ с};$$

– по каналу «тиск живильної води – тиск перед РЖК»:  $W_{ПТР}(S) = \frac{1 \cdot e^{-\tau \cdot S}}{T_{ПТР} S + 1}$ , де  $T_{ПТР} = 2 \text{ с}$ ,  $\tau = 2 \text{ с}$ ;

– по каналу «зміна положення регулюючого клапана приводної турбіни – частота обертання ТЖН»:

$$W_{Пгн}(S) = \frac{k_d S + k_{Пгн}^n}{T_{Пгн} S + 1}$$

$$k_d = 13.6 \frac{\text{об/хв}}{\text{с} \cdot \%}, k_{Пгн} = 13.3 \frac{\text{об/хв}}{\%}, T = 10 \text{ с}.$$

Численні значення коефіцієнтів передатних функцій засновуються на технічних специфікаціях енергоблоку та експериментальних даних.

**Висновки.** В роботі було розглянуто систему живлення парогенератора енергоблоку АЕС із реактором типу ВВЕР-1000. Була розроблена математична модель цієї ділянки, а також спроектована структурна схема математичної моделі. На основі отриманих даних може бути розроблена автоматизована система регулювання на основі ПІ-регулятора.

Список літератури:

1. Maksimov M.V., 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 WVER-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 optimization / Праці Одеського політехнічного університету. 2015. № 1(45). P. 134–140.
4. Давидов В.О., Крилов В.Н., Максимов М.В. Автоматизированная система распознавания / Искусств. интеллект. 2002. № 4. С. 462–469.
5. Ларіонова О.С., Тодорцев Ю.К., Бундюк А.М. Математична модель контура теплопостачання когенераційної енергетичної установки / Автоматика, автоматизація, електротехнічні комплекси та системи. 2009. № 2. С. 8–11.
6. Брунеткін О.І., 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. Серія : «Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування». 2014. № 12. С. 131–141.
7. Беглов К.В., Волошкіна О.О., Плахотнюк О.А. Дослідження регулятора концентрації рідкого поглинача енергоблоку АЕС / Автоматизація технологічних і бізнес-процесів. 2015. № 4. С. 18–24.
8. Уліцька О.О., Бундюк А.Н. Разработка алгоритма для расчёта статистики когенерационной энергетической установки / Холодильная техника и технология. 2013. № 3. С. 34–40.

**Nikulin D.S. STUDY OF THE POWER SUPPLY SECTION OF THE STEAM GENERATOR OF A NUCLEAR POWER UNIT WITH A VVER-1000 REACTOR**

*Electricity is an integral part of our time. Electricity use has steadily increased over time, both in industry and in everyday life. Today, Ukraine consumes more than 150 billion kilowatt-hours of electricity a year. Electricity must be supplied to consumers continuously, regardless of weather and other circumstances. Despite the active search for alternative energy sources, the bulk of electricity in Ukraine and the world is produced by organic fuel power plants, among which nuclear power plants that have high power and do not pollute the environment are favorably allocated [1, p. 99–102].*

*There are four nuclear power plants operating in Ukraine today: Zaporizhzhia, Khmelnytsky, Rivne and South Ukrainian. Their total capacity is about 14,000 MW. The electricity they produce is used by consumers across the country and even exported abroad. VVER-1000 and VVER-440 reactors are installed in power units of Ukraine. The principle of operation of nuclear power plants is to convert the energy of fission of atomic nuclei into electrical energy by heating the feedwater, which, when evaporated, transmits its energy, by rotating the generator of electricity.*

*The power supply of the steam generator that is the subject of this article is important for the NPP because it affects the steam flow of the main circulation pump and, as a consequence, the power of the unit. It is divided into two parts: an automatic steam generator power control system whose task is to maintain a material balance between steam withdrawal, purge and feed water supply, and an automatic turbocharger pump performance system that will change the feed water flow by changing its speed. These systems are managed using digital PI regulators, which are an integral part of the turbine engine software.*

**Key words:** NPP, automatic regulating system, turbine feed pump, steam generator, water, pressure.