УДК 621.039.534
DOI https://doi.org/10.32838/2663-5941/2019.3-1/31

***Терлецький В.О.***
Одеський національний політехнічний університет

***Лисюк Г.П.***
Одеський національний політехнічний університет

# МОДЕЛЮВАННЯ АСР ТЕМПЕРАТУРИ ПАРУ ЗА РЕДУКЦІЙНО-ОХОЛОДЖУВАЛЬНОЮ УСТАНОВКОЮ ЕНЕРГОБЛОКУ АЕС ВВЕР 1000 МВТ

*Об'єктом проектування є технологічна ділянка редукційно-охолоджувальної установки, що входить у другий контур енергоблоку АЕС. Регулювання температури пару за РОУ енергоблоку 1000 МВт Південно-Української АЕС. У тепловій схемі атомної електростанції з реактором типу ВВЕР-1000 застосовується РОУ 14/6, яка призначена для зниження тиску і температури пару до заданих параметрів. Застосування РОУ підвищує ефективність роботи парової турбіни і суттєво впливає на безпеку і надійність АЕС.*

***Ключові слова:*** *АЕС, енергоблок, редукційно-охолоджувальна установка, температура.*

**Постановка проблеми.** Редукційно-охолоджувальна установка призначена для зниження тиску і температури пару до заданих параметрів. Застосування РОУ підвищує ефективність роботи парової турбіни і суттєво впливає на безпеку і надійність АЕС.

Зниження тиску здійснюється за допомогою дросельного регулюючого клапана, а температури – уприскуванням охолоджуючої води. Ефективне управління редукційно – охолоджувальною установкою АЕС із ВВЕР у номінальних і аварійних режимах роботи значною мірою забезпечує динамічну стійкість системи регулювання як окремного об'єкта, так і всього енергоблоку. Дуже важливий параметр, від якого залежить виконання цих функцій, – тиск і температура пари за редукційно-охолоджувальною установкою, які мають підтримуватися на певному нормованому значенні.

При автоматизації процесу регулювання температури пару за РОУ найважливішими параметрами є температура та тиск редукованої пари. Якщо РОУ з будь-яких причин не функціонує належним чином, у паропровід може потрапляти велика кількість води, частина якої буде випаровуватися, охолоджуючи пар, а частина буде накопичуватися в нижній частині паропроводу, що неминуче призведе до зниження його пропускної здатності і ризику виникнення гідроудару.

**Постановка завдання.** Моделювання АСР температури пару за редукційно-охолоджувальною установкою АЕС ВВЕР 1000 МВт для запобігання аварійного стану по температурі.

Для досягнення мети потрібно було вирішити такі завдання:

– розробити математичну модель РОУ як об'єкта керування;

– на базі отриманої моделі провести розрахунки сталої часу та коефіцієнту регулювання;

– провести аналіз отриманих результатів із метою виявлення граничних характеристик регулювання.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** На АЕС редукційно-охолоджувальна установка (РОУ) застосовується для подачі пари на ущільнення турбіни, до ежекторів і пароежекторним машинам.

Точність підтримки тиску і температури редукованої пари диктується споживачем. Зазвичай точність підтримки тиску пара становить ± 2%, температури − 1,5%.

Свіжий пар надходить до дросельного клапана **2** через вхідну засувку **1**, дроселюється спочатку в дросельному клапані, а потім в шумоглушнику **3**. Останні застосовуються при навколозвукових або надзвуковому перепаді тиску.

Охолоджуюча вода надходить через водяну засувку **4** і регулюючий клапан **6** на форсунку **8**. Часто перед дросельним клапаном **6** встановлюється дросельний пристрій у вигляді дросельної шайби **5** або групи шайб. Це робиться в тих випадках, коли охолоджуюча вода подається до РОУ від джерела з високим тиском (наприклад, від живильного насоса), що значно перевищує тиск, необхідний для упорскування води.

Дросельний пристрій розраховується на пропуск такої кількості води, яка необхідна для охо-

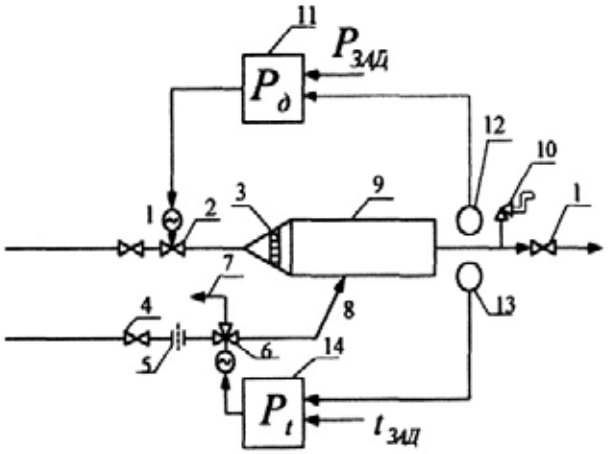


**Рис. 1. Принципова схема включення і регулювання РОУ**

лодження максимально можливої витрати пару. Для запобігання небезпечному підвищенню тиску дроселюючого пару на вихідному паропроводі встановлюється запобіжний пристрій **10**. На охолоджувачі пара **9** співвісно з його корпусом зазвичай встановлюється захисна труба, призначена для зменшення шкідливого впливу води на стінку охолоджувача пару.

Як об'єкт регулювання РОУ має дві регульовані величини: тиск і температура пари за РОУ.

Основним збурюючим впливом на тиск пару є зміна його споживання або тиску свіжої пари. Збурюючим впливом на температуру пару є зміна споживання пару, витрата і тиск свіжої пари.

Регулюючим впливом на тиск пару є зміна витрати свіжої пари, а на температуру − зміна витрати охолоджуючої води. Як об'єкт регулювання тиску РОУ володіє самовирівнюванням, і її динаміку можна описати рівнянням інерційної ланки першого порядку. Як об'єкт регулювання температури РОУ можна вважати безінерційним об'єктом, однак оскільки температура вимірюється інерційним датчиком, інерційність РОУ визначається інерційністю датчика.

Регулювання тиску здійснюється регулятором **11**, які отримує імпульс від манометра **12** і впливає на клапан **2**.

Температура дросельованого пара регулюється регулятором **14**, який отримує імпульс від термоперетворювача **13** і впливає на клапан **6**. Задля підвищення точності вимірювання температури термоперетворювач має встановлюватися на відстані 8−10 м після впорскування, щоб волога встигла повністю випаруватися. Іноді для збереження постійного перепаду тиску на клапані **6** в широкому діапазоні зміни витрат вприскування в якості клапана 6 трьох ходовий клапан постійної витрати. Такий клапан забезпечує зміну подачі води в пароохолоджувач шляхом скидання її в зливну лінію **7** при незмінній витраті води через дросель **5**.

Як об'єкт управління РОУ представляє динамічну систему з двома керуючими впливами: витрати перегрітої пари, охолоджувальної води і двома керованими параметрами (тиск і температура редукованої пари).

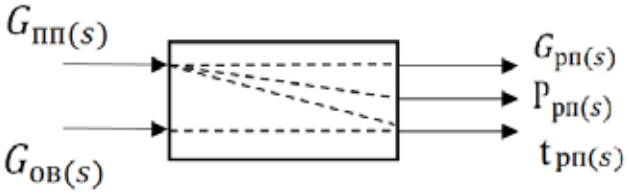


**Рис. 2. Параметрична схема об'єкта регулювання**

Для регулювання температури та тиску після редукційно-охолоджувальної установки використовується схем, зображена на рисунку 2, керуючою дією є зміна витрата охолоджувальної води G_ОВ та витрата перегрітого пару $G_{пп}$.

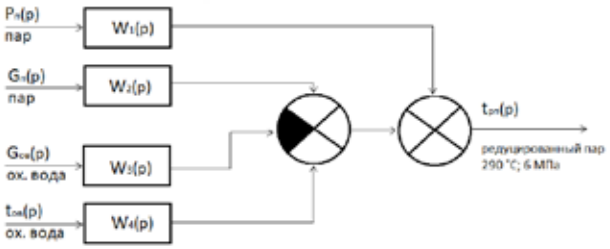


**Рис. 3. Структурна схема АСР РОУ**

Для цього об'єкта управління застосовується пропорційно-інтегральний закон регулювання, адже він забезпечує оптимальний час регулювання.

Об'єкт регулювання – одноємнісний; регульована величина – температура. Необхідні показники якості регулювання:

– максимальне динамічне відхилення регульованої величини t, ˚С = 20˚С;

– час регулювання tp = 10 с;

– система регулювання має забезпечити аперіодичний перехідний процес;

$$\tau = 1 \text{ с},$$

$$\tau/T = 1/2{,}6 = 0{,}38$$

$$К об = \Delta P/\Delta M = 2/5 = 0{,}4$$

На підставі відхилення $\tau/T = 0{,}38$ приймається регулятор безперервної дії.

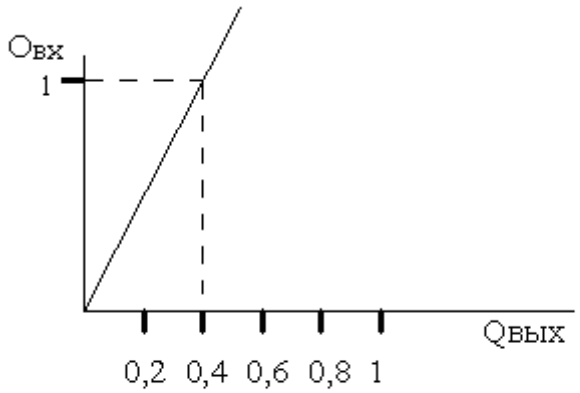


**Рис. 4. Статична характеристика**

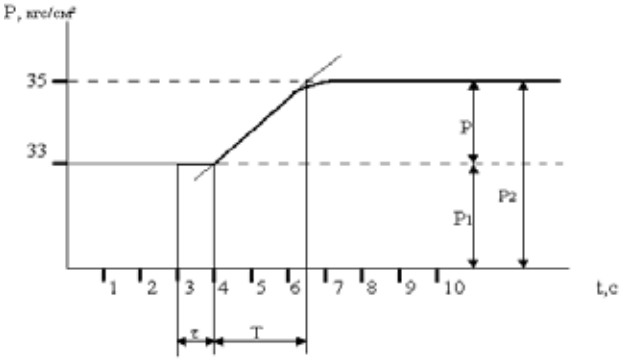


**Рис. 5. Статична характеристика**

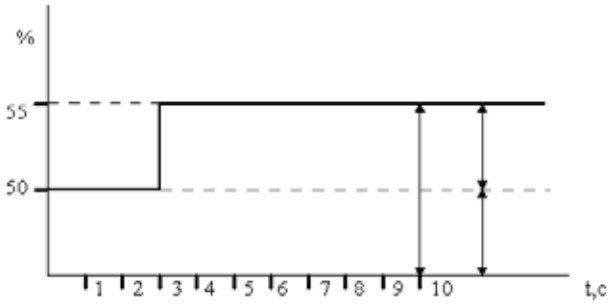


**Рис. 6. Статична характеристика**

За графіками характеристики процесу вибору закону управління з динамічним параметрами визначаємо динамічний коефіцієнт *R*д, який характеризує ступінь впливу регулятора на стабілізацію технологічного параметра.

При $\tau/T = 0{,}38$ за таблицями визначаємо *R*д і розраховуємо розрахунковий час регулювання.

Розрахунковий час регулювання не перевищує необхідного часу, отже, для цього об'єкта управління застосовується пропорційно-інтегральний закон управління, який має *R*д = 0,54 і $tp/\tau = 8$ (с), бо він забезпечує оптимальний час 10 с.

Розрахунок параметрів настроювання Кр, Ті за наближеними формулами:

$$Кр = 0{,}6*Т/Коб*\tau = 0{,}6*2{,}6/0{,}4*1 = 3{,}9,$$
$$Ти = 0{,}8*\tau + 0{,}5*Т = 0{,}8*1 + 0{,}5*2{,}6 = 2{,}1$$

Кр, Ті перевіряється за графічними залежностями

$$Кр = Кс/Коб = 1{,}4/0{,}4 = 3{,}5,$$
$$Ті = (Ті/\tau)*\tau = 2{,}3*1 = 2{,}3$$

За допомогою рівняння перевіряється стійкість системи управління з використанням критеріїв Гурвіца і Михайлова.

Система автоматичного управління описана диференційним рівнянням.

Критерій стійкості Михайлова:

$$3{,}5p3+5{,}5p2+17{,}6p+7=0,$$
$$p = i\omega,$$
$$3{,}5i\omega+5{,}5i\omega+17{,}6i\omega+7=0,$$
$$-3{,}5i\omega 3-5{,}5i\omega 2+17{,}6i\omega+7=0$$

Початкове рівняння ділиться на дві рівності дійсне і уявне.

$$U(\omega)=-5{,}5i\omega 2+7=0,$$
$$V(\omega)=-3{,}5i\omega 3-17{,}6i\omega=0$$

Надаючи ω значення ω = 0; 0,25; 0,5; 1; 1,5; 2; 3, результати розрахунку дійсної і уявної частин зводимо в таблицю 2.

Таблиця 1

**Таблиця дійсних і уявних значень**

| ω | 0 | 0,25 | 0,5 | 1 | 1,5 | 2 | 3 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| U(ω) | 7 | 6,65 | 5,62 | 1,5 | -5,37 | -15 | -42,5 |
| V(ω) | 0 | 4,35 | 8,37 | 14,1 | 14,59 | 7,2 | -41,7 |

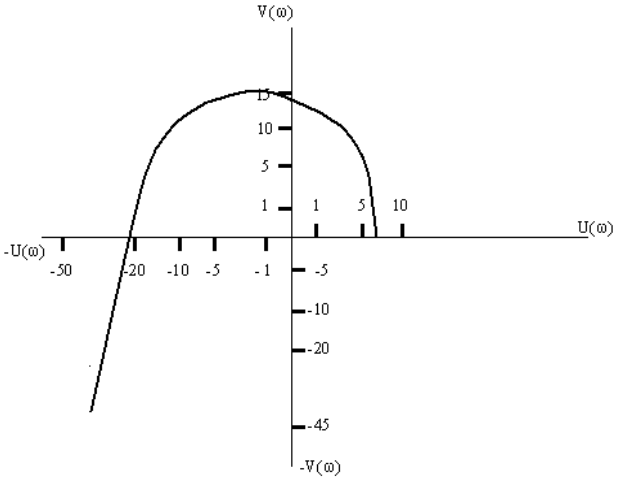


**Рис. 7. Годограф**

Згідно з умовою Михайлова система стійка.

Математична модель створена за допомогою програми Matlab.

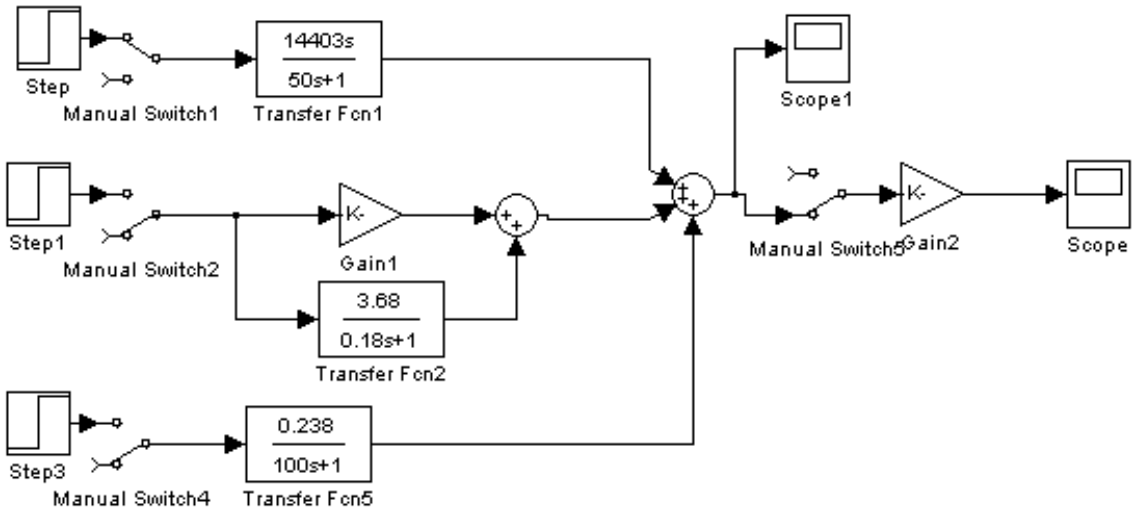


**Рис. 8. Структурна схема РОУ в Simulink**

Графіки перехідних процесів

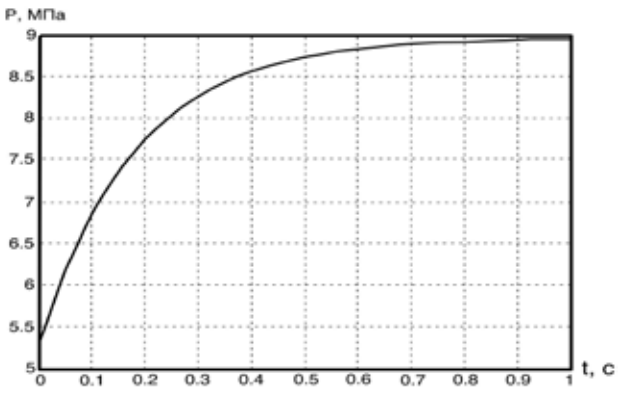


**Рис. 9. Залежність тиску від часу у вигляді передаточної характеристики**

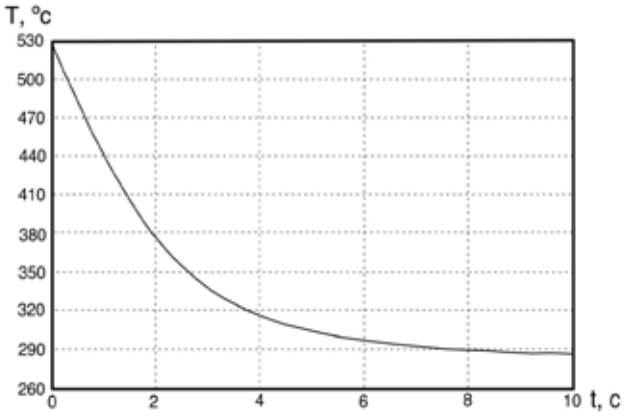


**Рис. 10. Графік перехідного процесу регулювання при збуренні по каналу $G_{ов}$**

**Висновки.** Було розглянуто такий технологічний об'єкт регулювання, як редукційно-охолоджувальна установка, яка є частиною другого контуру енергоблоку АЕС із реактором ВВЕР-1000. Було розглянуто принцип роботи редукційно-охолоджувальної установки. Також була розглянута параметрична схема технологічного об'єкту управління.

В результаті роботи була розроблена математична модель редукційно-охолоджувальної установки для регулювання температури пару шляхом забезпечення якості регулювання параметрів за РОУ. На базі отриманої моделі провели розрахунки сталої часу та коефіцієнту регулювання. Провели аналіз отриманих результатів і на підставі отриманих даних була розроблена автоматизована система регулювання температури за редукційно-охолоджувальною установкою, в якій управління РОУ здійснюється за допомогою цифрового ПІ-регулятора.

**Список літератури:**

1. Беркович В.М., Горохов В.Ф., Татарніков В.П. Про можливість регулювання потужності енергосистеми за допомогою атомних електростанцій. *Теплоенергетика*. 1974. № 6. С. 16−19.

2. Максимов М.В. Метод оцінки ефективності алгоритму маневру потужністю енергоблоку з реакторами ВВЕР-1000. *Известия вузів. Серія «Ядерна енергетика»*. 2008. Вип. 4. С. 128−139.

3. Баскаков В.Є. Алгоритм експлуатації енергоблоку з ВВЕР у підтримці добового балансу потужності енергосистеми. *Праці Одеського політехнічного університету*. 2007. Вип. 2(28). С. 56−59.

4. Сучасні технології управління : монографія : в 2 т. / під заг. ред. С.В. Купрієнко; Sworld. Одеса : Купрієнко С.В., 2012. 179 с.

5. Медведєв Р.Б., Сангінова О.В. Оптимальне керування процесом зміни концентрації борної кислоти в теплоносії першого контуру АЕС з ВВЕР-1000. *Наукові вісті Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*. 2002. Вип. 2(22). С. 29−56.

6. Волошкіна О.О., Беглов К.В., Плахотнюк О.А. Дослідження регулятора концентрації рідкого поглинача енергоблоку АЕС. *Автоматизація технологічних і бізнес-процесів*. 2015. Т. 7. Вип. 4. С. 18−24.

7. Кисельова Н.І., Погрібний Я. С., Беглов К. В. Дослідження регулятора потужності з рідким поглиначем для енергоблоку АЕС з ВВЕР-1000. *Вчені записки «Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського». Серія: Технічні науки*. 2018. Вип. 29(68). Ч. 1. № 3. С. 134−140.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ АСР ТЕМПЕРАТУРЫ ПАРА ПО РЕДУКЦИОННО–ОХЛАДИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКЕ ЭНЕРГОБЛОКА АЭС ВВЕР 1000 МВТ.**

*Объектом проектирования является технологический участок редукционно-охладительной установки, которая входит во второй контур энергоблока АЭС. Регулирование температуры пара за РОУ энергоблока 1000 МВт Южно-Украинской АЭС. В тепловой схеме атомной электростанции с реактором типа ВВЕР-1000 применяется РОУ 14/6, которая предназначена для снижения давления и температуры пара до заданных параметров. Применение РОУ повышает эффективность работы паровой турбины и существенно влияет на безопасность и надежность АЭС.*

***Ключевые слова:*** *АЭС, энергоблок, редукционно-охладительная установка, температура.*

**SIMULATION ASR OF THE TEMPERATURE OF THE STEAM AFTER THE REDUCTION COOLING INSTALLATION OF THE POWER UNIT NNP OF THE WWER 1000 MW**

*The object of the design is the technological part of the reduction and cooling unit, which is included in the second circuit of the NPP power unit. Regulation of the steam temperature for the RWU of the 1000 MW unit of the Ukrainian NPP. In the thermal scheme of a nuclear power plant with a WWER-1000 reactor, RCU 14/6 is used, which is designed to reduce the pressure and temperature of steam to the given parameters. Application of RCU improves the efficiency of the steam turbine and significantly affects the safety and reliability of the NPP.*

***Key words:*** *nuclear power plant, power unit, reduction and cooling plant, temperature.*