

Терлецький В.О.

Одеський національний політехнічний університет

Давидов В.О.

Одеський національний політехнічний університет

МОДЕЛЮВАННЯ АВТОМАТИЧНОЇ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ ПОТУЖНОСТІ ЕНЕРГОБЛОКУ АТОМНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ ІЗ ВВЕР-1000 В РЕЖИМІ «Т»

Стаття присвячена регулюванню потужності енергоблоку із ВВЕР-1000 МВт Южно-Української АЕС. Основним завданням регулювання паросилової установки є підтримка потужності реактора відповідно до потужності турбіни при одночасній підтримці заданого тиску пари, підтримці заданого значення нейтронної потужності реактора і обмеженні збільшення тиску пари, а також підтримка рівності між кількістю виробленої і спожитої енергії. Невідповідність між виробленою в реакторі і спожитою в турбіні енергією проявляється (для двоконтурної АЕС) у зміні тиску і температури теплоносія в 1-му контурі і тиску (температури) насиченої пари в 2-му контурі.

Для усунення невідповідності між виробленою в реакторі і спожитою в турбіні енергією використовується автоматичний регулятор потужності енергоблоку, який керує або турбіною, або реактором залежно від режиму роботи енергоблоку. Такий регулятор використовують з вимогою підтримання сталої надійності і безпеки енергоблоку, а також у разі зносостійкості обладнання (тепловиділяючих елементів) і збереження економічної ефективності енергоблоку.

Автоматичний регулятор потужності є невід'ємною частиною системи управління потужністю енергоблоку. Він призначений для підтримки потужності реактора відповідно до навантаження турбінного генератора.

Існують певні переваги та недоліки роботи енергоблоку в режимі «Т».

Переваги: полегшення температурних умов 2-го контуру при знижених навантаженнях; використання ПГ мінімальної вартості.

Недоліки: зміна реактивності внаслідок зміни середньої температури теплоносія; значні зміни температурного стану компонентів АЗ і разі переходу на новий рівень потужності; мінливість об'єму теплоносія.

Таким чином, стаття присвячена вивченню властивостей регулятора потужності.

Ключові слова: АЕС, енергія, АРП, синтез регулювання, математична модель, SCADA Trace Mode.

Постановка проблеми. Автоматичний регулятор потужності (далі –АРП) призначений для приведення потужності реактора у відповідність до потужності турбіни при одночасній підтримці заданого тиску пари, підтримці заданого значення нейтронної потужності реактора і обмеженні збільшення тиску пари. Від якості регулювання залежить надійність і безпека енергоблоку, а також підтримка його економічної ефективності. Таким чином, стаття присвячена дослідженню властивостей регулятора потужності.

Постановка завдання. Мета статті – моделювання автоматичної системи регулювання (далі – АСР) потужності енергоблоку АЕС з ВВЕР-1000 в режимі «Т» для забезпечення надійності і безпеки енергоблоку.

Для досягнення мети потрібно вирішити такі завдання:

- розробити математичну модель енергоблоку в режимі «Т»;
- на базі отриманої моделі провести синтез системи регулювання з обліком сучасних технологічних засобів контролю та управління;
- провести аналіз отриманих результатів для виявлення характеристик регулювання;
- провести моделювання та реалізацію на розробленій моделі автоматизованої системи регулювання потужності енергоблоку.

Виклад основного матеріалу дослідження. Автоматичний регулятор потужності (АРП, АРПР) призначений для приведення потужності реактора у відповідність до потужності турбіни при одночасній підтримці заданого тиску пари, підтримці заданого значення нейтронної потужності реактора і обмеженні збільшення тиску пари.

Для виконання цього завдання АРПР забезпечує відповідно до заданих алгоритмів формування і подачу команд «БІЛЬШЕ» (вгору) або «МЕНШЕ» (вниз) в СГІУ для управління робочою групою. Як робоча група використовується одна з регулюючих груп ОР СУЗ.

Регулювання потужності реактора здійснюється в таких режимах:

- режим «Т» – підтримання постійного тиску пари в головному паровому колекторі в діапазоні від 20 до 102% номінальної потужності реактора з зоною нечутливості $\pm 0,05$ МПа;

- режим «Н» – підтримання постійного значення щільності нейтронного потоку в діапазоні від 3 до 100% номінальної потужності реактора з зоною нечутливості $\pm 1\%$ від номінальної потужності реактора;

- режим «С» – це режим, за якого регулятор подає команду на переміщення ЗР вниз у разі перевищення тиску пари в ЦПК на 0,19 МПа.

Призначення АРП

Автоматичний регулятор потужності (АРП) є складовою частиною системи регулювання потужності енергоблоку і призначений для таких дій:

- стабілізації потужності реактора на заданому рівні (режим «Н»);

- підтримання потужності реактора відповідно до навантаження ТГ (підтримка тиску в ЦПК) (режим «Т»);

- обмеження тиску в ЦПК на заданому рівні (режим «С»).

Витрата теплоносія 1-го контуру в енергоблоці з реактором ВВЕР постійна, тому потужність реактора $N = k(t_{вих} - t_{вх})$. Крім того, в барабанному ПГ в 2-гому контурі отримують насичену пару, для якої температура і тиск пов'язані.

Розрізняють такі програми регулювання: з постійною середньою температурою t_{cp} теплоносія 1-го контуру; з постійним тиском пари в 2-гому контурі ($P_s = \text{const}$); компромісні програми.

Розглянемо переваги та недоліки програми з постійним тиском пари в 2-гому контурі ($P_s = \text{const}$) (рис. 2).

Переваги: полегшення температурних умов 2-го контуру при знижених навантаженнях; використання ПГ мінімальної вартості.

Недоліки: зміна реактивності внаслідок зміни середньої температури теплоносія; значні зміни температурного стану компонентів АЗ під час переходу на новий рівень потужності; мінливість об'єму теплоносія.

Під час розроблення і дослідження систем автоматичного управління за допомогою ядерних енергетичних установок (далі – ЯЕУ) користуються математичними моделюванням. Для сучасних 2-контурних ЯЕУ з реактором ВВЕР математична модель (далі – ММ), що враховує всі складні динамічні процеси, описується системою багатьох нелінійних диференціальних рівнянь. Дослідження такої системи ускладнене. Водночас для розв'язання деяких інженерних і учбових

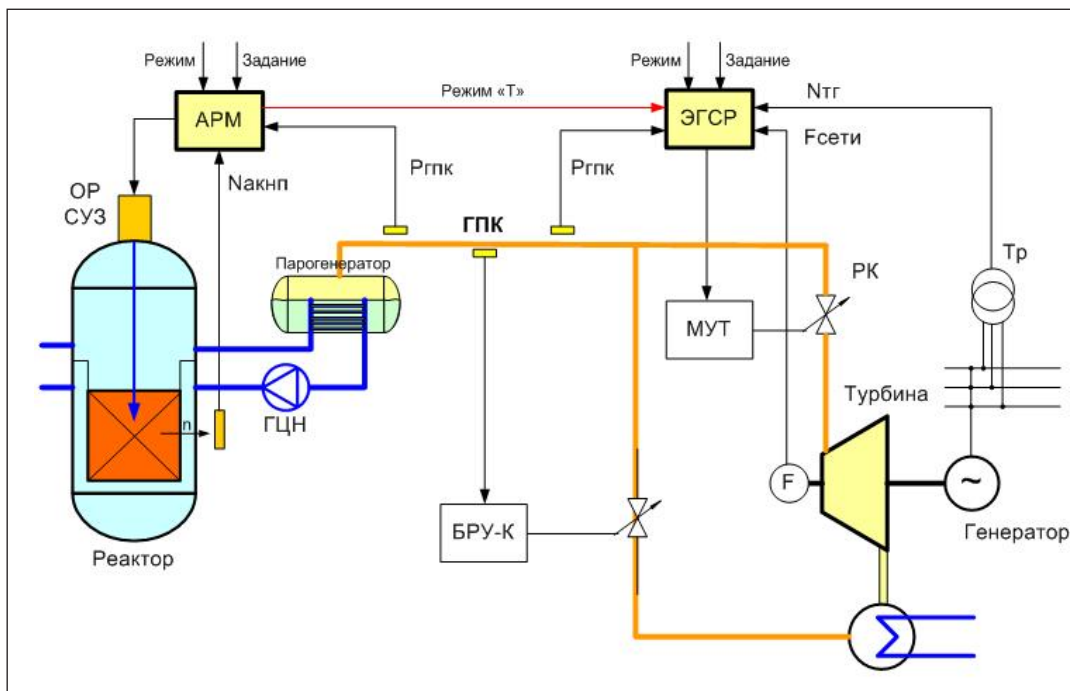


Рис. 1. АРП в системі регулювання енергоблоку АЕС з ВВЕР

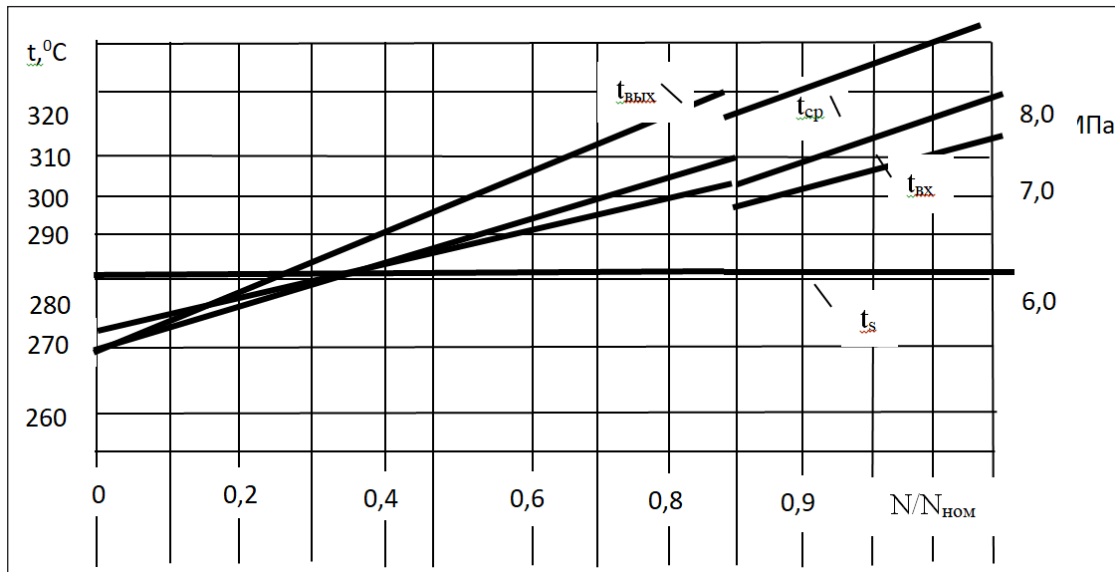


Рис. 2. Статична програма ($P_s = \text{const}$)

задач можливе використання спрощених ММ, які забезпечують достатню точність.

У даному проєкті ставиться завдання розробки спрощеної ММ ЯЕУ з реакторами ВВЕР для дослідження такої ММ на ЕОМ.

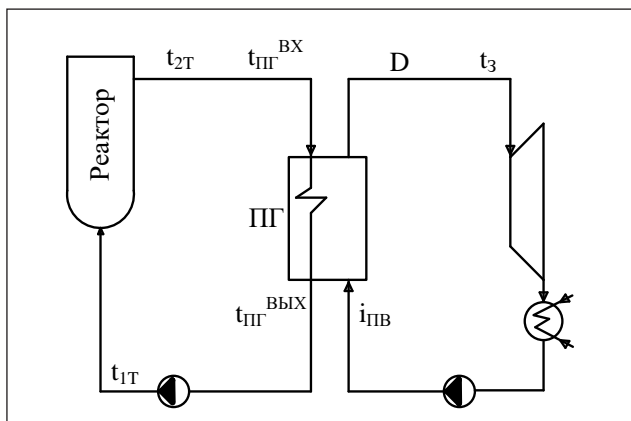


Рис. 3. Технологічна схема 2-контурної АЕС

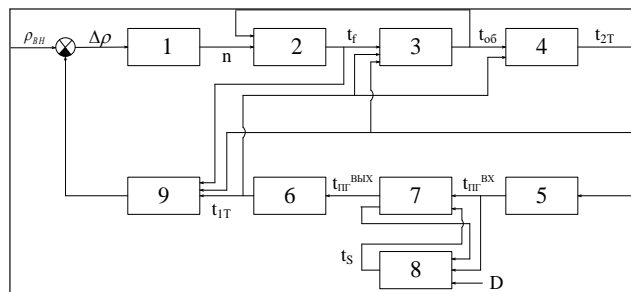


Рис. 4. Структурна схема енергоблоку

На рисунку 3 зображена принципова схема 2-контурної АЕС з реактором, парогенератором, турбіною і циркуляційними насосами. Ця схема має позначення фізичних величин.

Ядерний реактор описується рівнянням кінетики, що зв'язує реактивність ρ з відносною густиною нейтронів n , і рівнянням температурного ефекту реактивності теплоносія і палива. Крім того, в ЯЕУ є такі структурні елементи (рисунок 4): ядерне паливо (2); оболонка тепловидільного елемента (3); теплоносій в реакторі (4); трубопроводи від реактора до ПГ (5) і назад (6); ПГ теплоносія першого контуру (7); ПГ теплоносія другого контуру (8).

Далі йтиметься про перехідні процеси, що відбуваються в середовищі Simulink. На рисунку 5 представлена структурна схема ММ в середовищі Simulink.

Апроксимуємо криву й знайдемо налагодження за методикою Л.І. Кона:

$$K_m = 4.5 \cdot 10^{-3}; \quad T_a = 0.12 \text{ с}; \quad \tau = 0.02 \text{ с}; \quad q = \tau / T_a = 0.02 / 0.12 = 0.17 \approx 3 \text{ шт};$$

$$\alpha = 0.17; \quad m = 0.37; \quad K = 1.28; \quad C = 2.61; \quad K = K_p \cdot K_m = 1.28;$$

$$K_p = K / K_m = 1.28 / 0.0045 = 0.0035; \quad T_i = C \cdot \tau = 2.61 \cdot 0.02 = 0.05 \text{ с}.$$

Апроксимуємо криву й знайдемо налагодження за методикою Л.І. Кона:

$$K_m = -0.32; \quad T_a = 16 \text{ с}; \quad \tau = 3 \text{ с}; \quad q = \tau / T_a = 3 / 16 = 0.18 \approx 3 \text{ шт};$$

$$\alpha = 0.17; \quad m = 0.37; \quad K = 1.39; \quad C = 3; \quad K = K_p \cdot K_m = 1.39;$$

$$K_p = K / K_m = 1.39 / -0.32 = -4.34; \quad T_i = C \cdot \tau = 3 \cdot 3 = 9 \text{ с}.$$

Підставимо знайдені налаштування регулятора у структурну схему моделі АСР в прикладному пакеті Simulink і скоректуємо їх для отримання необхідних перехідних процесів.

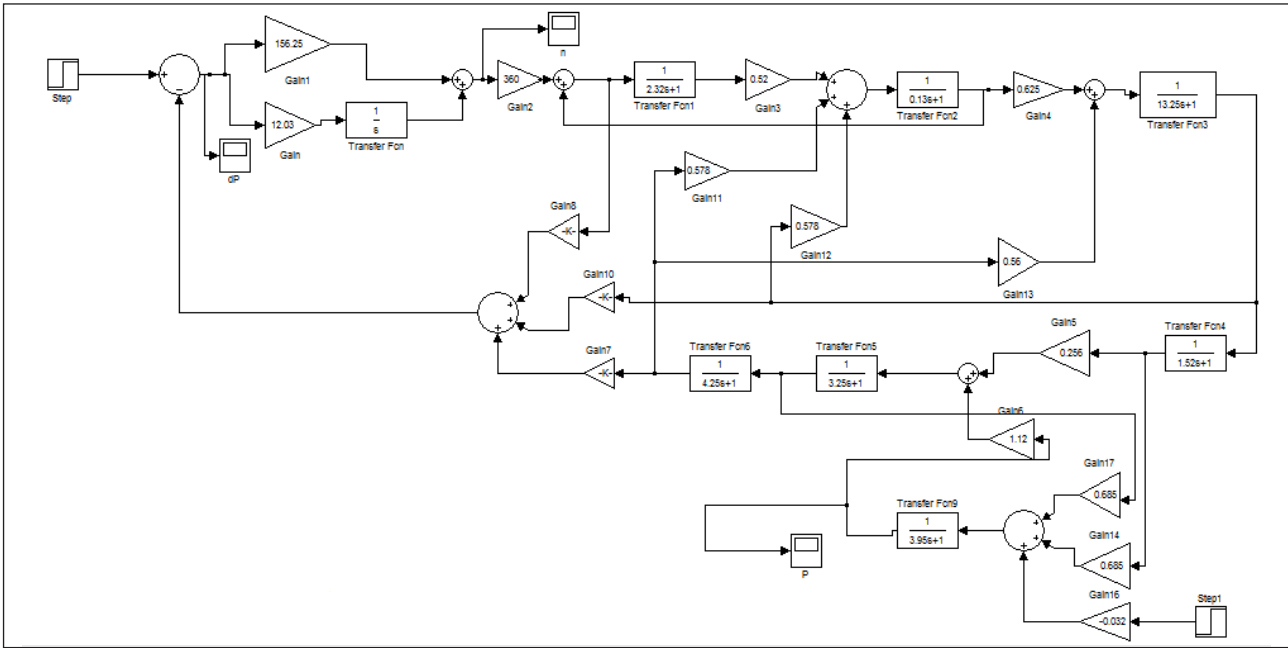


Рис. 5. Структурна схема ММ в середовищі Simulink

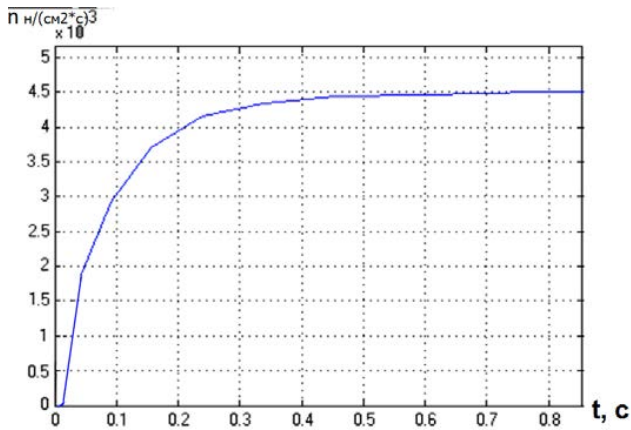


Рис. 6. Крива розгону за каналом «зовнішня реактивність - відносна потужність реактора» ($\rho_{вн} \rightarrow n$)

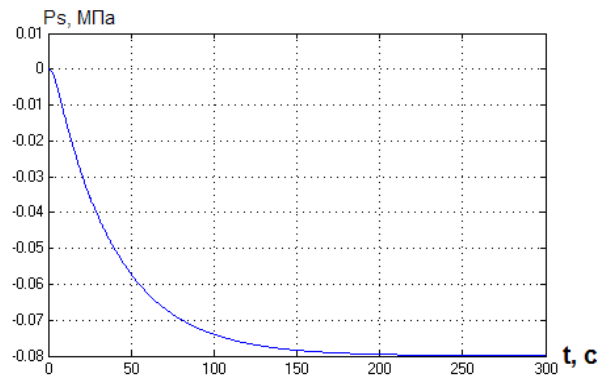


Рис. 7. Крива розгону за каналом «зовнішня реактивність – тиск пари перед ГПК» ($\rho_{вн} \rightarrow P_s$)

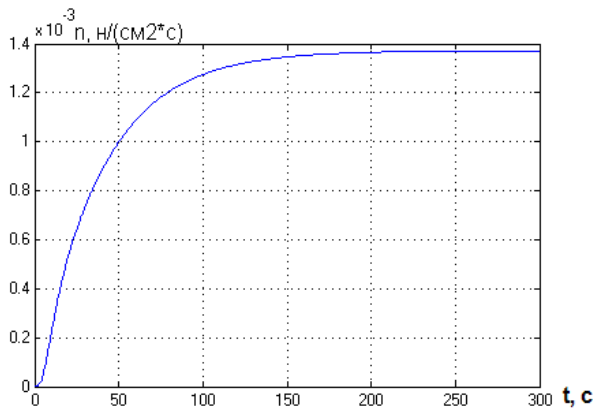


Рис. 8. Крива розгону за каналом «частота обертання – відносна потужність реактора» ($n_{зад} \rightarrow n$)

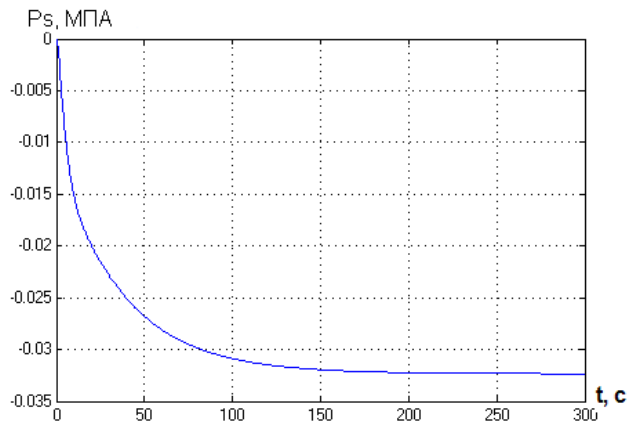


Рис. 9. Крива розгону за каналом «частота обертання – тиск пари перед ГПК» ($n_{об} \rightarrow P_s$)

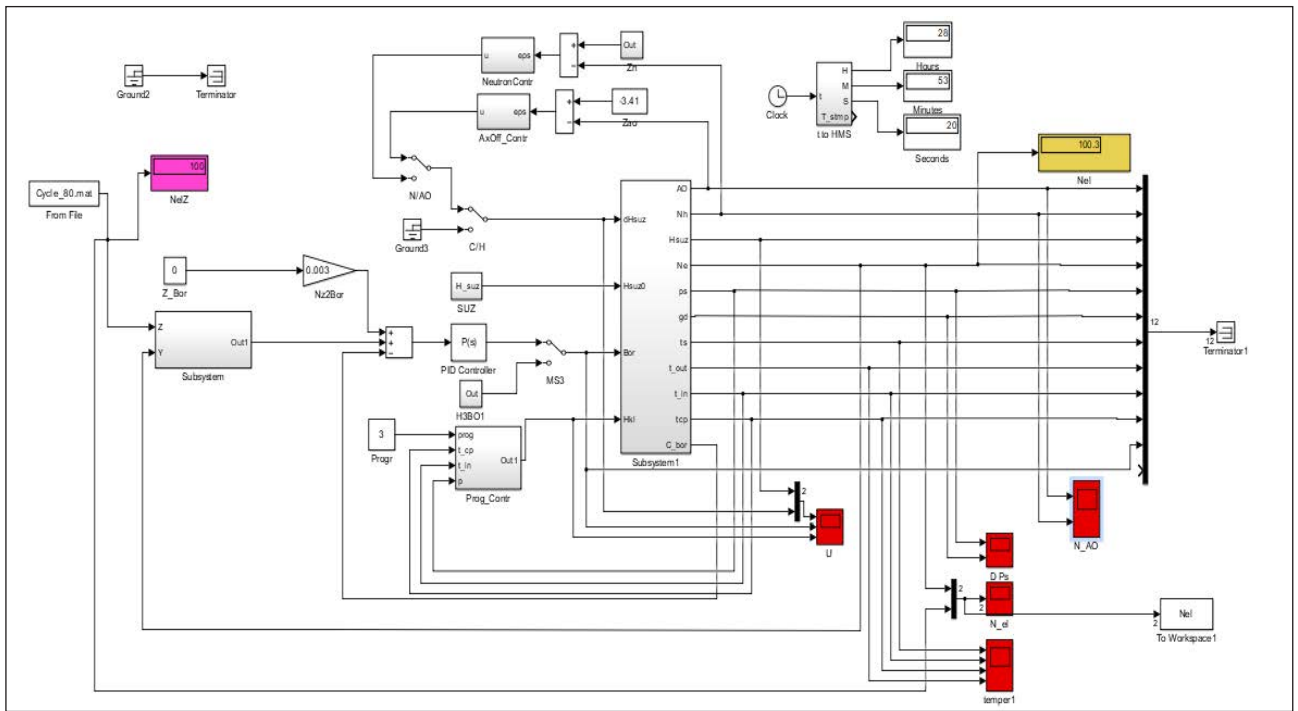


Рис. 10. Структурна схема АСП з регулятором тиску

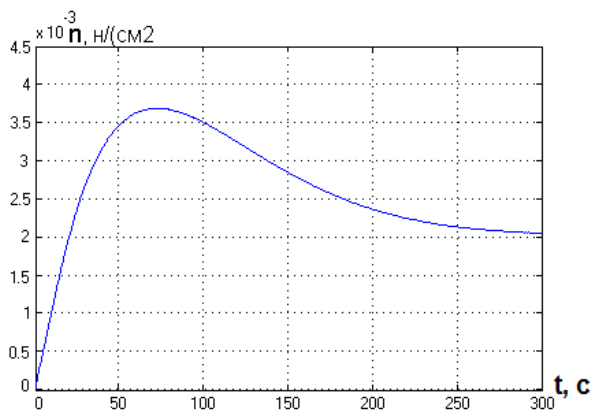


Рис. 11. Перехідний процес регулювання при збуренні за зовнішньою реактивністю

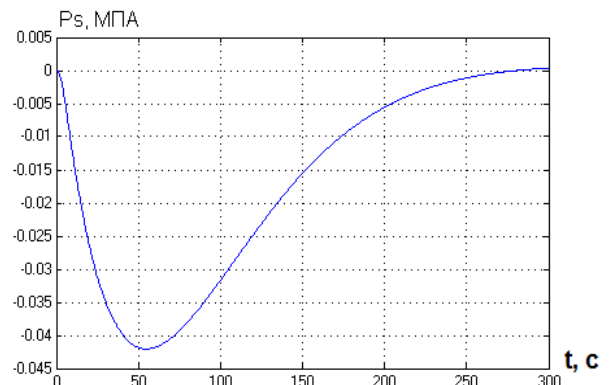


Рис. 12. Перехідний процес регулювання при збуренні за зовнішньою реактивністю

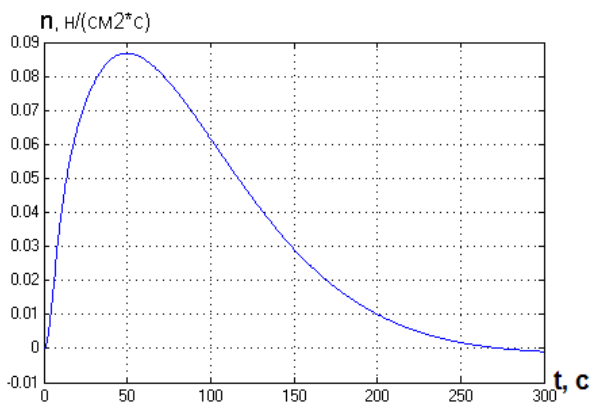


Рис. 13. Перехідний процес регулювання при збуренні за потужністю генератора

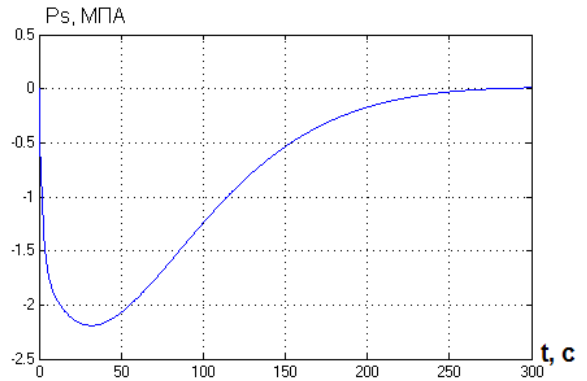


Рис. 14. Перехідний процес регулювання при збуренні за потужністю генератора

Приводи СУЗ спільно з органами регулювання є виконавчими механізмами системи регулювання та захисту реактора ВВЕР-1000, за допомогою яких здійснюється регулювання потужності, компенсація надлишкової реактивності і зупинка реактора шляхом введення і виведення ОР з активної зони реактора, а також аварійної зупинки реактора через скидання ОР у разі знеструмлення приводів.

Згідно з даними випробувань час зниження ОР СУЗ в активній зоні становить від 2 до 4 сек і не перевищує допустимого за проектом часу зниження ОР СУЗ в режимі «А3». Швидкість руху груп ОР СУЗ в режимі скидання після сходу з ВКВ є постійною на всій висоті активної зони.

Під час проведення дослідів було використано програмний комплекс класу SCADA системи TRACE MODE. SCADA-система призначена для диспетчерського управління та збору даних. Для програмування алгоритмів керування технологічними процесами в SCADA-системі було використано програму TRACE MODE-6, в якій було створено дві екранні форми (мнемосхеми) підтримки

тиску та тренд ОР СУЗ, який буде показувати зміни параметрів тиску.

Висновок. Було розглянуто АРП в системі регулювання енергоблоку АЕС з ВВЕР-1000 та принцип роботи автоматичного регулятора потужності, що дозволяє підтримувати потужність енергоблоку у базовому режимі. Також була розглянута технологічна схема АРП в системі регулювання енергоблоку АЕС з ВВЕР-1000.

В результаті проведеної роботи була розроблена математична модель регулювання потужності енергоблоку АЕС з ВВЕР-1000 в режимі «Т». На базі отриманої моделі ми провели синтез системи регулювання з обліком сучасних технологічних засобів контролю та управління. Також ми провели аналіз результатів роботи. На підставі отриманих даних була розроблена автоматизована система регулювання потужності енергоблоку АЕС з ВВЕР-1000 в режимі «Т». Ми дійшли висновку, що органом регулювання є регулюючі стрижні 10-ї групи. Режим «Т» сприятливий для обладнання другого контуру.

Список літератури:

1. Беркович В.М., Горохов В.Ф., Татарніков В.П. Про можливість регулювання потужності енергосистеми за допомогою атомних електростанцій. *Теплоенергетика*. 1974. Вип. 6. 19 с.
2. Максимов М.В. Метод оцінки ефективності алгоритму маневру потужністю енергоблоку з реакторами ВВЕР-1000. *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 с.
4. Сучасні технології управління : монографія : в 2 т. / під заг. ред. С.В. Купрієнко. Одеса, 2012. 179 с.
5. Медведєв Р.Б., Сангінова О.В. Оптиміальне 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.

Terletsy V.A., Davydov V.O. SIMULATION ASR OF POWER OF THE POWER UNIT OF THE NPP WITH VVER-1000 IN MODE “Т”

Power regulation of the WWER unit of 1000 MW of the South Ukrainian NPP. The main task of regulating the steam power plant is to maintain the reactor power in accordance with the power of the turbine while maintaining the set steam pressure, maintaining the setpoint of the neutron power of the reactor and limiting the increase in steam pressure, well as maintaining equality between the amount of produced and consumed energy. The mismatch between the generating reactor energy and that consumed in the turbine manifests itself (for two circuit NPP) with a change in the pressure and temperature of the coolant in the 1st circuit and the pressure (temperature) of the saturated steam in the 2nd circuit .

An automatic power regulator is used to eliminate the mismatch between the reactor power generation and turbine power consumption. Which in turn has a controlling effect on the turbine or the reactor, depending on the operating mode of the power plant with the requirement, not reducing the reliability and safety of the power unit, and also so that the effect of equipment wear is not enhanced, first of all it is, it of fuel elements, and the effectiveness of the power unit was maintained.

The automatic of power controller is an integral part of the power unit power control system and is designed to maintain the of reactor capacity in according to the load of the turbine generator.

Advantages and disadvantages of power unit operation in T mode:

Advantages: facilitating the temperature conditions of the 2nd circuit under reduced loads; use of minimum cost GHG.

Disadvantages: change in reactivity due to change in average coolant temperature; significant changes in the temperature state of the components of the AZ at the transition to the new power level; variability of the coolant volume.

Thus, the article is devoted to the study of the properties of the power regulator.

Key words: *NPP, energy, ARP, synthesis synthesis, mathematical model, SCADA Trace Mode.*