

Нікулін Д.С.

Одеський національний політехнічний університет

Ложечніков В.Ф.

Одеський національний політехнічний університет

АВТОМАТИЧНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ ТЖН ЕНЕРГОБЛОКУ АЕС З РЕАКТОРОМ ВВЕР-1000

У статті розглядається технологічна ділянка групи ТЖН, що належить до другого контуру енергоблоку АЕС. Турбоживильні насоси призначені для подачі живильної води з деаераторів через систему регенерації високого тиску в парогенератори. На АЕС з реактором ВВЕР-1000 застосовуються турбоживильні насосні агрегати ПТА 3750-75. Головним параметром, що регулюється в ТЖН, є витрата води на виході [1, с. 99-102]. Управління здійснюється за допомогою цифрових ПІ-регуляторів на базі програмно-технічного комплексу АСР турбінного відділення.

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

Постановка проблеми. Ділянка живлення парогенератора має важливе значення для АЕС, бо вона впливає на витрату пари на ГЦН, і, як наслідок, на потужність енергоблоку. Вона поділяється на дві частини: автоматичну систему регулювання живлення парогенератора, задачею якої є підтримка матеріального балансу між відводом пари, продувкою і подачею живильної води, і автоматичною системою регулювання продуктивності ТЖН, що змінює витрату живильної води шляхом зміни його оборотів.

Через технічну складність проведення регулярного ремонту і модернізації АЕС України часто устатковані застарілим обладнанням. Впровадження мікропроцесорної техніки на заміну аналоговій дозволить підвищити надійність та ефективність виробництва. Запропонована у даній роботі АСР продуктивності турбоживильного насосу енергоблоку АЕС із реактором типу ВВЕР-1000 направлена саме на такі цілі.

Постановка завдання. Завдання, що вирішується у статті, полягає у розробці сучасної автоматизованої системи регулювання продуктивності ТЖН на основі цифрових регуляторів, що спростить експлуатацію турбоживильних насосів та забезпечить їх ефективну роботу.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Розроблення математичної моделі

Для синтезу дискретних оптимальних і багатомірних систем регулювання передатні функції структурних елементів схеми ділянки живлення повинні бути перетворені в диференційні системи із урахуванням зв'язків між елементами об'єднані в одне матричне диференціальне рівняння.

Отже, динамічні властивості ТЖН описуються наступними диференціальними рівняннями:

$$T_{ПН} \Delta \dot{n} + \Delta n = k_d \Delta \dot{u}_5 + k_{ТЖН}^n \Delta u_5; \quad (1)$$

$$\Delta W_{ТЖН} = k_w \cdot \Delta n; \quad (2)$$

$$\Delta P_{ТЖН} = k_p \cdot \Delta n; \quad (3)$$

де Δn – зміна частоти обертання приводної турбіни живильного турбонасоса, викликана змінною положення регулюючих клапанів приводної турбіни ТЖН; k_w , k_p – коефіцієнти передачі ТЖН – визначається графоаналітичним методом по напірним характеристикам живильного турбонасоса.

Динамічні властивості трубопроводів від ТЖН до РЖК і від РЖК до ПГ отримані з відповідних передатних функцій:

$$T_{ПТР} \Delta \dot{P}_{РЖК} + \Delta P_{РЖК} = (1 - \tau) \cdot (\Delta P_{ТЖН} + k_{cv} \cdot \Delta u_{1,2,3,4}); \quad (4)$$

$$T_{ТР} \Delta \dot{W} + \Delta W = \Delta W_{ТЖН} + \Delta W_{РЖК}; \quad (5)$$

$$\Delta W_{РЖК} = k_{PO} \cdot \Delta u_{1(2,3,4)} + k_{cv} \cdot \Delta u_{2,3,4(1)}; \quad (6)$$

де k_{PO} – коефіцієнт передачі регулюючого живильного клапана (визначається графічно по його видатковій характеристиці), k_{cv} , k_{cv}^p – коефіцієнти взаємного впливу регулюючих живильних клапанів на витрати живильної води в ПГ (визначаються графоаналітичним способом по гідравлічній характеристиці живильного трубопроводу від ТЖН до ПГ і напірної характеристики турбоживильного насоса) і впливу положення регулюючих живильних клапанів на тиск живильної води перед ними відповідно.

Динаміка паропроводу від парогенераторів до головного парового колектора по витраті і тискові пари, і динаміка трубопроводу першого контуру

по різниці температур теплоносія отримані по експериментальним кривим розгону.

$$T_1 \Delta \dot{D} + \Delta D = (1 - \tau) \cdot k_1 \cdot \Delta N ; \quad (7)$$

$$T_2 \Delta \dot{P}_{ГПК} + \Delta P_{ГПК} = (1 - \tau) \cdot k_2 \cdot \Delta N ; \quad (8)$$

$$T_1 \Delta \dot{T} + \Delta T = k_1 \cdot \Delta N . \quad (9)$$

Сигнал по зміні різниці температур необхідний для задаючого сигналу по тепловій потужності для регулятора продуктивності ТЖН. Транспортне запізнювання введено в регулюючі канали за рівнем пароводяної суміші в парогенераторі і тискові живильної води перед РЖК на підставі експериментальних даних, і його прояв може бути пояснено нечуттєвістю вимірювальних перетворювачів і люфтами в кінематичній схемі виконавчого механізму регулюючих органів.

Отже, описана вище технологічна ділянка живлення барабанного парогенератора як об'єкт регулювання рівня води в ПГ і продуктивності живильного насоса описується системою диференціальних рівнянь(1)-(9), і їй відповідає структурна схема математичної моделі ділянки живлення представлена на рисунку 1.

Ця система диференціальних рівнянь може бути перетворена в систему матричних різницевих рівнянь із відповідним періодом дискретності виду:

$$\begin{cases} x_{i+1} = A_i \cdot x_i + B_i \cdot u_i + F_i \cdot f_i; \\ y_i = C \cdot x_i; \end{cases}$$

де x_i – вектор внутрішнього стану, що відповідає номінальному режиму функціонування системи; y_i – вектор контрольованих параметрів (вихід системи), u_i – вектор керуючих впливів, f_i – вектор основних збурювань, A_i, B_i, F_i, C – матриці коефіцієнтів відповідних розмірностей. Для забезпечення високої якості моделювання процесів у всьому діапазоні зміни навантажень, варто думати, що матриці A_i, B_i, F_i не являються цілком визначеними, а належать підмножинам $A_i \in \bar{A}_i \pm \Delta A_i, B_i \in \bar{B}_i \pm \Delta B_i, F_i \in \bar{F}_i \pm \Delta F_i$, де $\bar{A}_i, \bar{B}_i, \bar{F}_i$ – номінальні матриці підмножин, а $\Delta A_i, \Delta B_i, \Delta F_i$ – матриці відхилень, такі що $\bar{A}_{i+1} = \bar{A}_i + \Delta A_i, \bar{A}_{i-1} = \bar{A}_i - \Delta A_i, i=1..n$, де n – число розглянутих режимів функціонування, а матриці $\bar{B}_{i \pm 1}, \bar{F}_{i \pm 1}$ ^{3/4} визначаються аналогічно.

Були отримані передатні функції ділянки регулювання, а саме:

- по каналу "електрична потужність – тиск пари"

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

- 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":

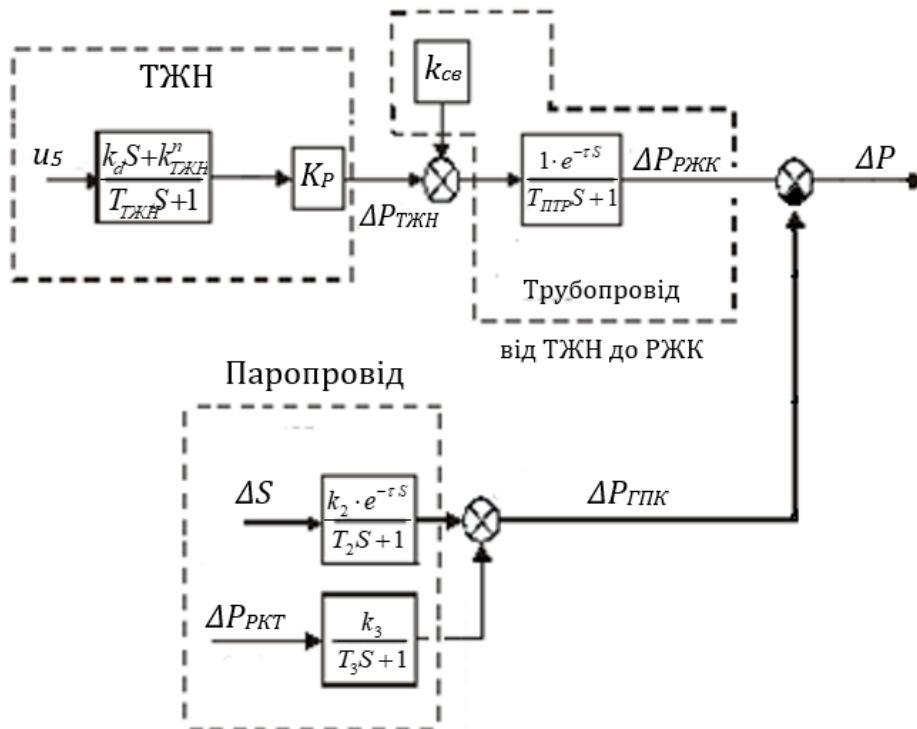


Рис. 1. Структурна схема математичної моделі ділянки живлення

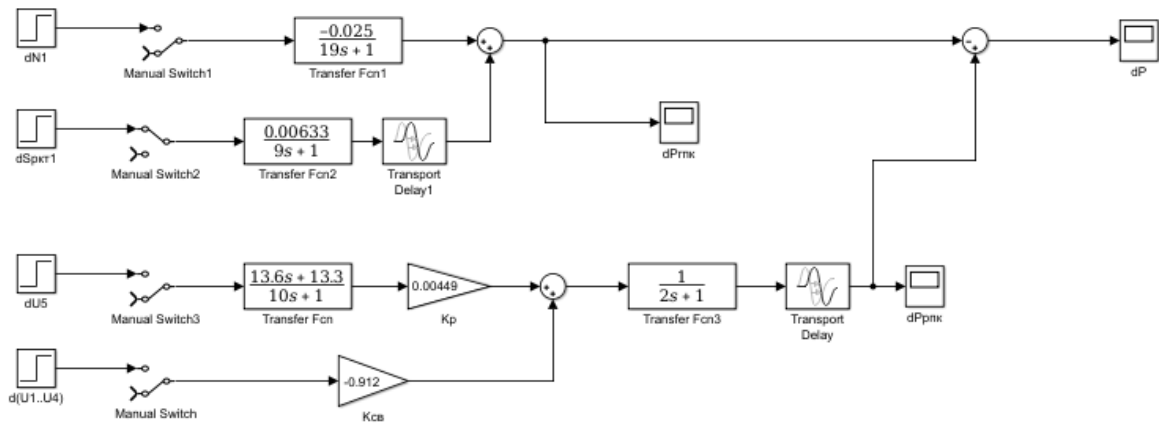


Рис. 2. Модель об'єкта регулювання

$$W_{ПТР}(S) = \frac{1 \cdot e^{-\tau} S}{T_{ПТР}S + 1}, \text{ де } T_{ПТР} = 2 \text{ с}, \tau = 2 \text{ с};$$

- по каналу "зміна положення регулюючого клапана приводної турбіни – частота обертання ТЖН "

$$W_{ПТН}(S) = \frac{k_d S + k_{ПТН}^n}{T_{ПТН}S + 1}, \text{ де}$$

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

Чисельні значення коефіцієнтів передатних функцій математичної моделі були визначені за конструктивним і теплотехнічним параметрами енергоблоків та по експериментальним даним.

У програмному середовищі Simulink збудовано структурну схему моделі дільниці регулювання (рис. 2).

На основі розробленої моделі отримана крива розгону турбоживильного насоса (рис. 3).

Після обробки кривої розгону ТОУ отримали:

$$\tau = 2 \text{ с}; \quad T = 8 \text{ с}.$$

$$K_{об} = 0,24 \frac{\text{МПа}}{\% \times \text{РО}}$$

$$Kp = \frac{1}{K_{об} \cdot \tau / T}$$

ΔP , МПа

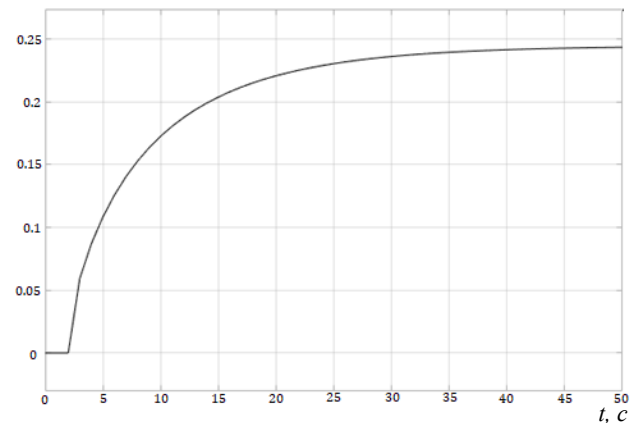


Рис. 3. Крива розгону турбоживильного насоса за каналом регулювання

$$Kp = \frac{1}{0,24 \cdot \frac{2}{8}} = 27,59 \frac{\% \times \text{РО}}{\text{МПа}}$$

$$T = Tu; \quad Tu = 8 \text{ с}.$$

Отже, передатна функція регулятора має вигляд:

$$W(p) = 27,59 + \frac{1}{8S}$$

Модель об'єкта з вбудованим та налаштованим ПІ-регулятором матиме наступний вигляд:

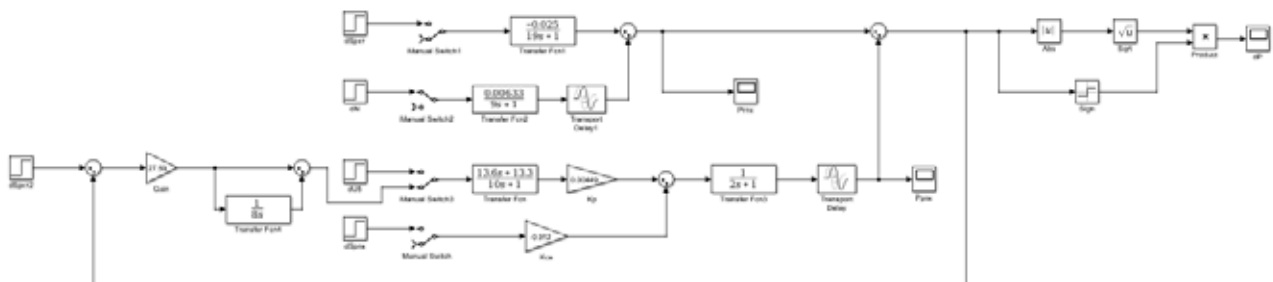


Рис. 4. Структурна схема ділянки регулювання з ПІ – регулятором

За таких налаштувань регулятора були отримані наступні перехідні процеси регулювання:

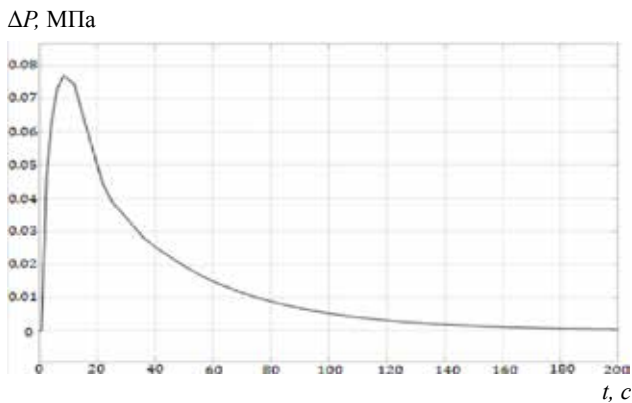


Рис. 5. Перехідний процес регулювання за каналом S_{PKT}

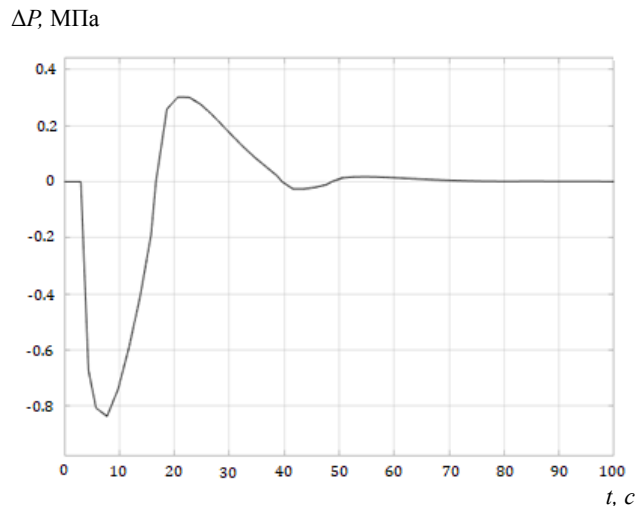


Рис. 7. Перехідний процес регулювання за каналом $\Delta S_{ржск}$

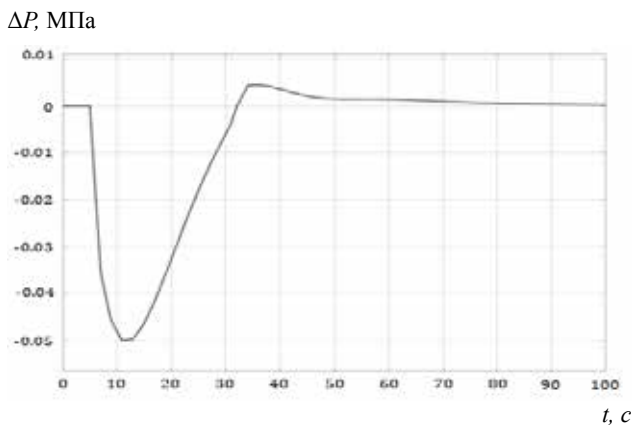


Рис. 6. Перехідний процес регулювання за каналом ΔN

Висновки. У роботі було розглянуто автоматизовану систему регулювання продуктивності турбоживильного насосу, що живить парогенератор енергоблоку АЕС.

В результаті роботи була створена математична модель ділянки живлення парогенератора, отримані оптимальні налаштування ПІ-регулятора. Перехідні процеси регулювання об'єкта управління демонструють високу якість керування регульованими параметрами.

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 WWER-1000 nuclear unit / *Nuclear Engineering and Design*. 2011. № 241(8). P. 2956–2963.
3. Ложечников В.Ф., Михайленко В.С. Методи побудови адаптивних систем управління / *Автоматика. Автоматизація. Електротехнічні комплекси та системи*. 2009. № 2. С. 174–179.
4. 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.
5. 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.
6. Бундюк А.Н., Улицкая О.О. Разработка алгоритма для расчёта статистики когенерационной энергетической установки / *Холодильная техника и технология*. 2013. № 3. С. 34–40.
7. 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

АВТОМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ТПН ЭНЕРГОБЛОКА АЭС С РЕАКТОРОМ ВВЭР-1000

В статье рассматривается технологический участок группы ТПН, что относится ко второму контуру энергоблока АЭС. Турбопитательные насосы предназначены для подачи питательной воды из деаэраторов через систему регенерации высокого давления в парогенераторы. На АЭС с реакто-

ром ВВЭР-1000 применяются турбопитательных насосные агрегаты ПТА 3750-75. Главным параметром, регулируется в ТЖН, является расход воды на выходе[1, с. 99-102]. Управление осуществляется с помощью цифровых ПИ-регуляторов на базе программно-технического комплекса АСР турбинного отделения.

Ключевые слова: АЭС, автоматическая система управления, ТПН, парогенератор, давление.

AUTOMATIC SYSTEM FOR REGULATING THE PERFORMANCE OF THE TURBINE DRIVEN PUMPS OF AN NPP POWER UNIT WITH A WWER-1000 REACTOR

This article discusses the technological section of the turbine driven pumps group belonging to the second circuit of the NPP power unit. Turbine driven pumps are designed to supply feed water from deaerators through a high-pressure regeneration system to steam generators. «ПТА 3750-75» turbine driven pumping units are used at NPPs with a VVER-1000 reactor. The main regulated parameters is the discharge water flow rate[1, p. 99-102]. The control of turbine driven pumps is carried out with the help of digital PI-regulators on the basis of the automatic control system of the turbine compartment.

Key words: NPP, automatic control system, turbine driven pump, steam generator, pressure.