

Сичило А.А.

Одеський національний політехнічний університет

Беглов К.В.

Одеський національний політехнічний університет

Лисюк Г.П.

Одеський національний політехнічний університет

МОДЕЛЮВАННЯ АСР ПОТУЖНОСТІ ЕНЕРГОБЛОКУ АЕС З ВВЕР-1000 В РЕЖИМІ «Т»

Сьогодні в Україні велика частина електроенергії виробляється на атомних електростанціях (52%). Внесок теплових електростанцій становить близько 45%. Виробництво енергії з екологічно чистих джерел електроенергії становить близько 7% усієї виробленої в країні енергії. Основним завданням регулювання паросилової установки є підтримка рівності між кількістю виробленої та споживаної енергії. Невідповідність між виробляючою енергією в реакторі та споживаною в турбіні проявляється (для двоконтурних АЕС) зі зміною тиску і температури теплоносія в 1-му контурі і тиску (температури) насиченої пари в 2-му контурі. Вказана невідповідність має усуватися автоматичним регулятором потужності енергоблоку, який надає керуючий вплив або на реактор, або на турбіну залежно від режиму роботи енергоблоку з вимогою, щоб надійність і безпека енергоблоку були знижені, а також щоб економічна ефективність енергоблоку зберігалася на необхідному рівні. Вивчення автоматизованої системи регулювання потужності енергоблоку АЕС в режимі «Т», який дасть змогу експлуатувати енергоблок у маневрених режимах добового циклу для підтримки балансу потужності в енергосистемі України.

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

Постановка проблеми. У багатьох роботах, присвячених проблемі покриття змінної частини графіків навантажень [1, с. 16–19; 2, с. 128–139], вказується, що підвищення частки атомних електростанцій (далі – АЕС) в загальній встановленій потужності вимагає підвищеної маневреності енергообладнання АЕС, тобто роботи енергоблоків АЕС в змінному режимі. В [3, с. 56–59] був запропонований новий алгоритм підтримки технологічних параметрів енергоблоку. Для реалізації запропонованого алгоритму в АСУТП енергоблоку була розроблена математична модель [4, с. 108–122], за допомогою якої досліджувалися властивості енергоблоку за різних програм регулювання. Для реалізації зазначеного алгоритму був застосований новий регулятор потужності енергоблоку. Отже, стаття присвячена дослідженню властивостей регулятора потужності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Стаття на тему «Аналіз впливу методів управління потужності енергоблоку з водо-водяним реактором аксіальний офсет» [1, с. 58–63] присвячена аналізу впливу методів управління потужності енергоблоку ВВЕР-1000 в маневреному режимі

на кількісну міру стійкості, а саме – на величину аксіального офсету реактора.

Постановка завдання. Метою статті є вивчення автоматизованої системи регулювання потужності енергоблоку АЕС в режимі «Т», який дасть змогу експлуатувати енергоблок у маневрених режимах добового циклу для підтримки балансу потужності в енергосистемі України. Досягнення мети здійснюється вирішенням таких завдань: розроблення математичної моделі енергоблоку в режимі «Т»; синтез системи регулювання з обліком сучасних технологічних засобів контролю та управління; моделювання та реалізація на розробленій моделі автоматизованої системи регулювання потужності енергоблоку.

Виклад основного матеріалу дослідження. АРПР (АРП) – призначений для приведення потужності реактора відповідно до потужності турбіни за одночасної підтримки заданого тиску пари, підтримки заданого значення нейтронної потужності реактора і обмеження збільшення тиску пари.

Для виконання цього завдання АРПР забезпечує відповідно до заданих алгоритмів форму-

вання і видачу 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 із зоною нечутливості $\pm 0,05$ МПа;

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

- режим «С» – сторожам режим, за якого регулятор видає команду на переміщення ЗР вниз у разі перевищення тиском пари в ЦПК номінального на 0,19 МПа.

Призначення АРП.

Автоматичний регулятор потужності АРП є складовою частиною системи регулювання потужності енергоблоку і призначений для:

- 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»).

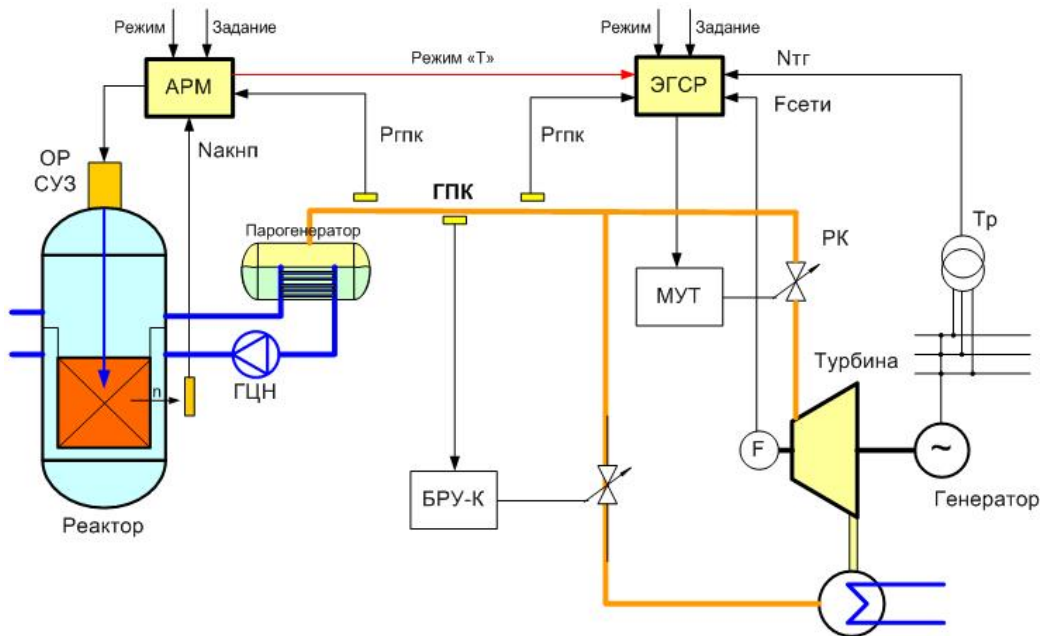


Рис. 1. АРП в системі регулювання енергоблоку АЕС з ВВЕР

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-ому контурі отримують насичений пар, для якого температура і тиск пов'язані одночасно.

Розрізняють такі програми регулювання: з постійною середньою температурою t_{cp} теплоносія 1-ого контуру; з постійним тиском пара в 2-ому контурі $P_s = \text{const}$; компромісні програми.

Розглянемо переваги та недоліки програми:

З постійним тиском пара в 2-ому контурі $P_s = \text{const}$ (рис. 2).

Переваги: полегшення температурних умов 2-ого контуру за знижених навантажень; 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 ядерними енергетичними установками (далі – ЯЕУ) користуються математичними моделюваннями. Для сучасних 2-контурних ЯЕУ з реактором типу ВВЕР математична модель (далі – ММ), що враховує всі складні динамічні процеси, описується системою багатьох нелінійних диференціальних рівнянь. Рішення і дослідження такої системи ускладнено. Водночас для деяких інженерних і учбових

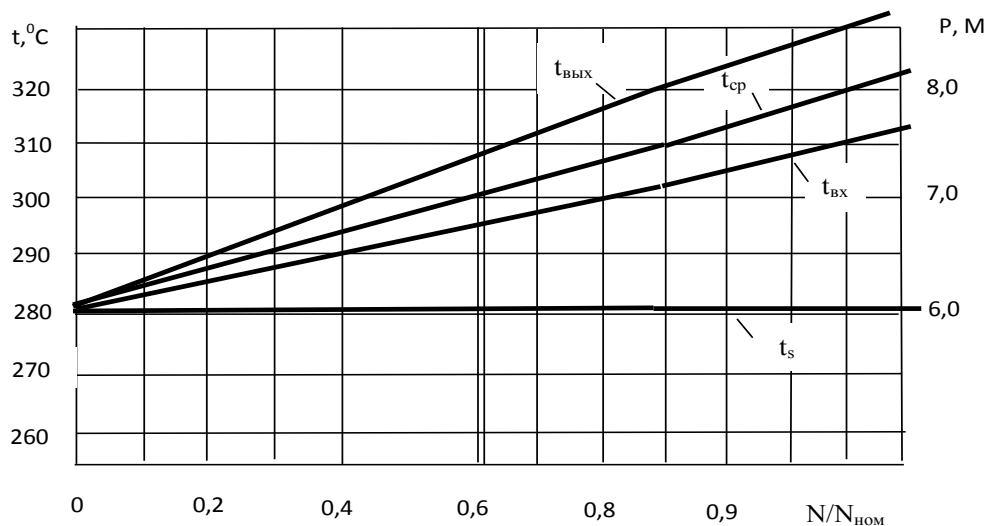


Рис. 2. Статична програма $P_s = \text{const}$

завдань можливе використання спрощених ММ, які забезпечують достатню точність.

У цьому проекті ставиться завдання розроблення спрощеної ММ ЯЕУ з реакторами типу ВВЕР з дослідженням такої ММ на ЕОМ.

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

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

Перехідні процеси з вищеназваних каналів є в середовищі Simulink. На рисунках 3, 4 представлена структурна схема в середовищі Simulink.

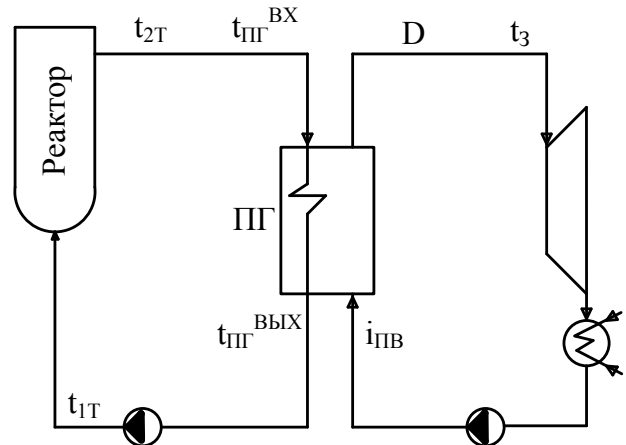


Рис. 3. Технологічна схема 2-контурної АЕС

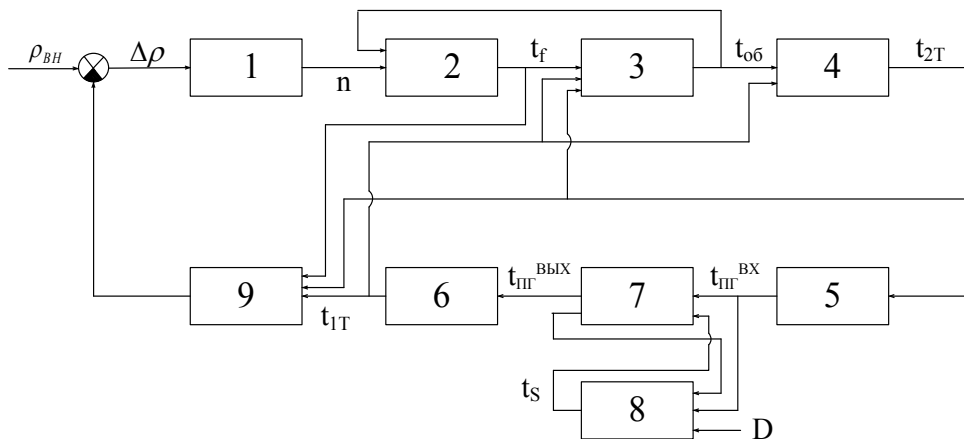


Рис. 4. Структурна схема енергоблоку

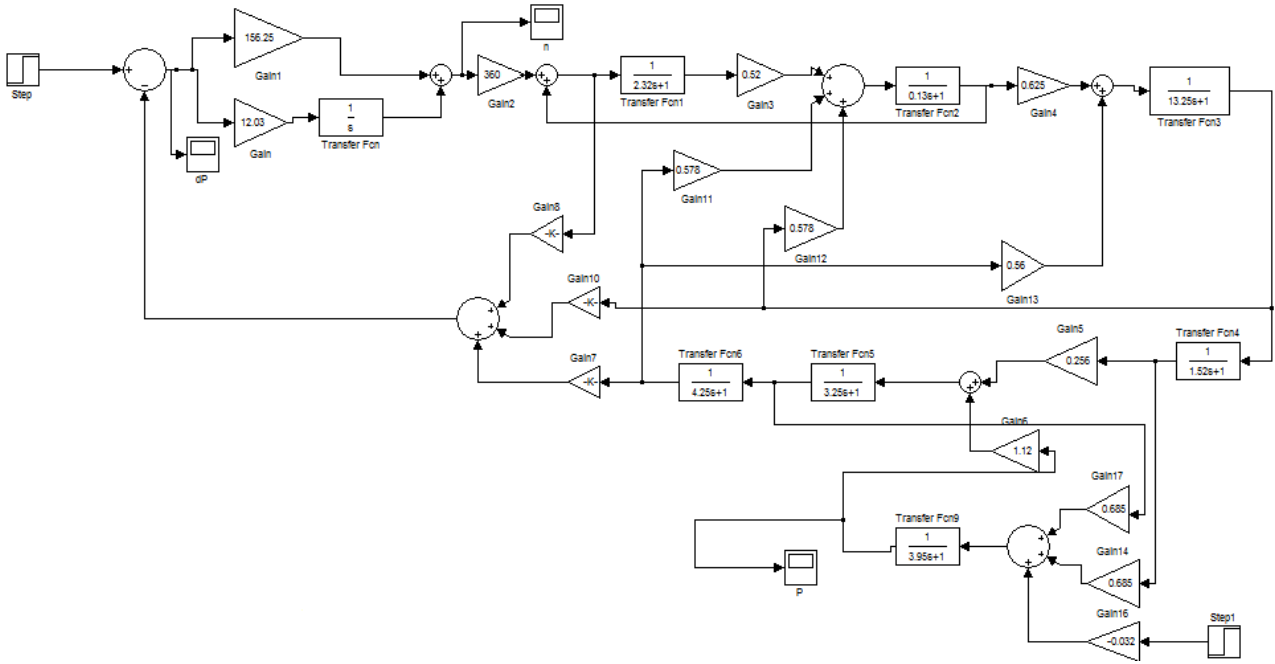


Рис. 5. Структурна схема ММ у середовищі Simulink

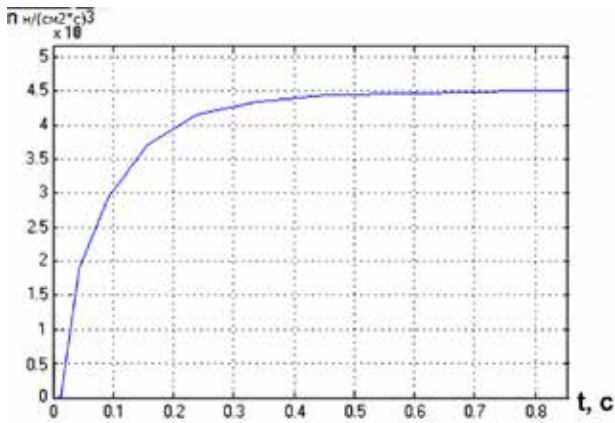


Рис. 6. Крива розгону по каналу зовнішня реактивність – відносна потужність реактора ($\rho_{en} \rightarrow n$)

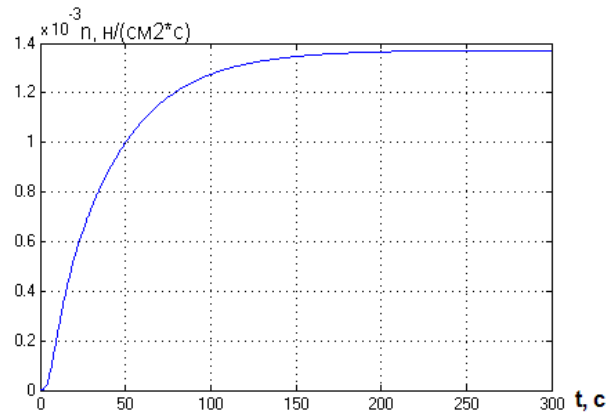


Рис. 8. Крива розгону по каналу частота обертання – відносна потужність реактора ($n_{\omega 0} \rightarrow n$)

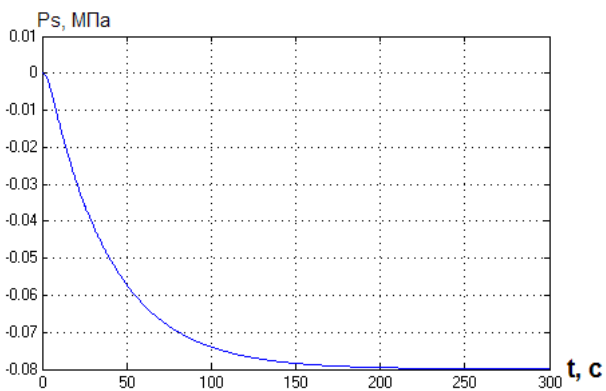


Рис. 7. Крива розгону по каналу зовнішня реактивність – тиск пари перед ГПК ($\rho_{en} \rightarrow P_S$)

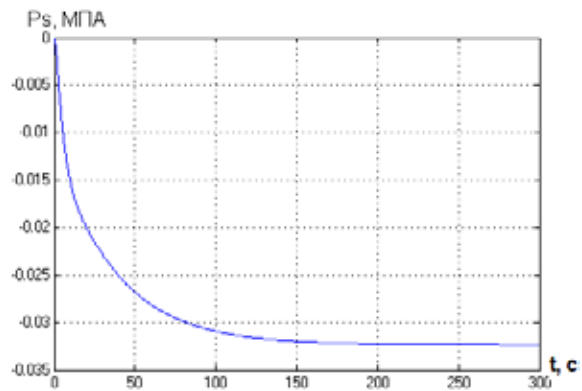


Рис. 9. Крива розгону по каналу частота обертання – тиск пари перед ГПК ($n_{\omega 0} \rightarrow P_S$)

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

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

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

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

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

$$K_M = -0.32; T_a = 16 \text{с}; \tau = 3 \text{с};$$

$$q = \tau/T_a = 3/16 = 0.18 \approx 3 \text{шт}$$

$$\alpha = 0.17; m = 0.37; K = 1.39; C = 3;$$

$$K = K_p \cdot K_M = 1.39;$$

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

У структурній схемі моделі АСР в прикладному пакеті Simulink підставимо знайдені настройки регулятора і скоригуємо їх для отримання необхідних перехідних процесів.

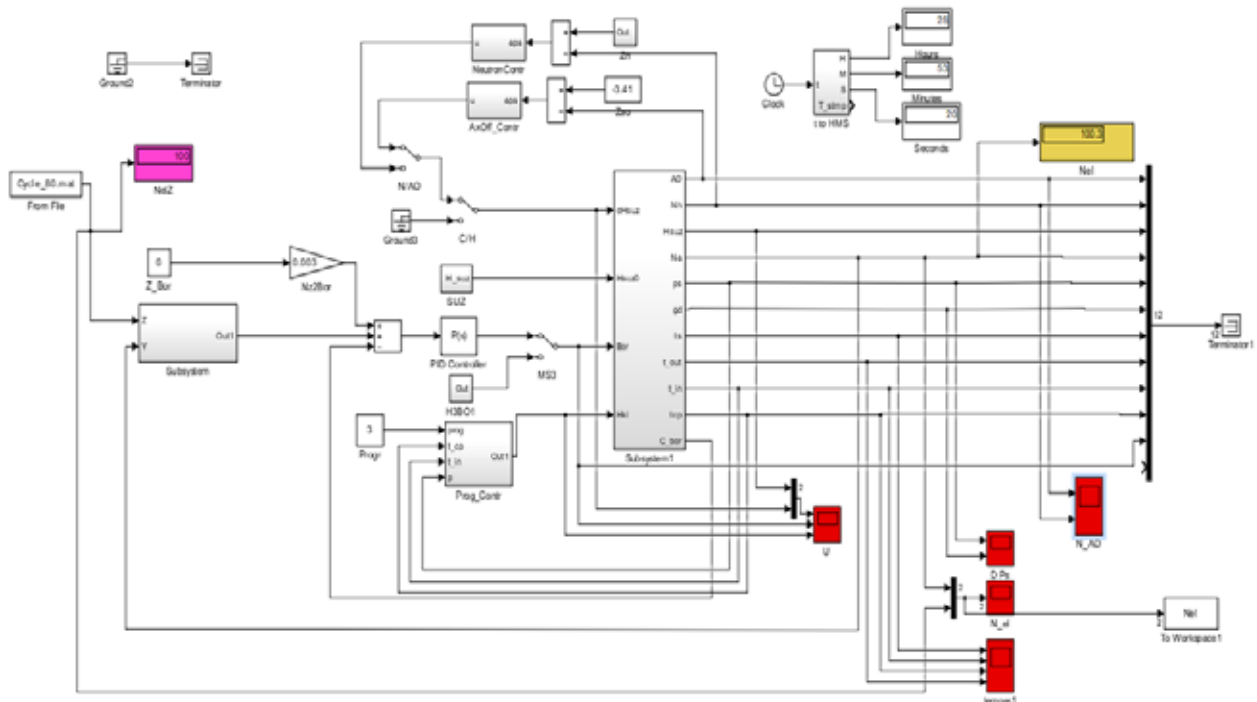


Рис. 10. Структурна схема АСР з регулятором тиску

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

За даними випробувань, час падіння ОР СУЗ в активній зоні становить від 2 до 4 с і не перевищує допустимого за проектом часу падіння ОР СУЗ в режимі АЗ. Швидкість руху груп ОР СУЗ в режимі скидання після сходу з ВКВ постійна по всій висоті активної зони.

Як програмне забезпечення 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 TRACE MODE 6, в якій було створено дві екранні форми (мнемосхеми). Принципова схема енергоблоку підтримки тиску та тренд ОР СУЗ, яким буде показувати зміну параметра тиску.

Висновки. Отримано результати, які полягають у створенні автоматизованої системи керування потужністю енергоблоку з ВВЕР-1000 у режимі «Т», що дає змогу підтримувати потужність енергоблоку у базовому режимі. Під час розроблення математичної моделі енергоблоку в режимі потужності енергоблоку в режимі «Т» можливо зробити висновок, що органом регулювання є регулюючі стрижні 10-ї групи. Режим «Т» благополучний для обладнання другого контуру.

Список літератури:

1. Теплотехнічний довідник : у 2-х томах. Т. 2. / Ред. В. Юрнев, П. Лебедев. Видавництво «Енергія», 1976.
2. Демченко В.А. Автоматичні системи регулювання технологічними процесами АЕС. ОНПУ, 1994.
3. Методичні вказівки з курсового проектування з дисципліни «Автоматичні системи управління технологічними процесами об'єктів АЕС». Одеса, 1988.
4. Методичні вказівки з курсового проектування з дисципліни «Автоматичні системи управління технологічними процесами об'єктів АЕС, Регулювання енергоблоків». Одеса : ОНПУ, 1994.
5. Довідкові таблиці: Тиск насиченої пари води. URL: <http://fptl.ru/spravo4nik/davlenie-vodyanogo-para.html> (дата звернення: 01.05.2019).
6. Методи регулювання температури перегрітої пари. URL: <http://msd.com.ua/parovye-kotly-tes/metody-regulirovaniya-temperatury-peregretogo-para/> (дата звернення: 01.05.2019).
7. Системи турбінного відділення (частина 1). Центр підготовки персоналу. Росенергоатом, 2000.
8. Основне обладнання реакторного відділення (частина 1). Центр підготовки персоналу. Росенергоатом, 2000.

ИЗУЧЕНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ МОЩНОСТИ ЭНЕРГОБЛОКА АЭС В РЕЖИМЕ «Т»

В настоящее время в Украине большая часть электроэнергии производится на атомных электростанциях (52%). Вклад тепловых электростанций составляет около 45%. Производство энергии из экологически чистых источников электроэнергии составляет около 7% всей производимой в стране энергии. Основной задачей регулирования паросиловой установки является поддержка равенства между количеством производимой и потребляемой энергии. Несоответствие между производимой энергией в реакторе и потребляемой в турбине проявляется (для двухконтурной АЭС) с изменением давления и температуры теплоносителя в 1-м контуре и давления (температуры) насыщенного пара во 2-м контуре. Указанное несоответствие должно устраняться автоматическим регулятором мощности энергоблока, который придает управляющее влияние или на реактор, или на турбину в зависимости от режима работы энергоблока с требованием, чтобы надежность и безопасность энергоблока не были понижены, а также чтобы экономическая эффективность энергоблока сохранялась на необходимом уровне. Изучение автоматизированной системы регулирования мощности энергоблока АЭС в режиме «Т» позволит эксплуатировать энергоблок в маневренных режимах суточного цикла для поддержания баланса мощности в энергосистеме Украины.

Ключевые слова: АЭС, энергия, компромиссная программа, синтез регулирования, математическая модель, SCADA Trace Mode.

THE STUDYING OF THE AUTOMATED SYSTEM OF THE OUTPUT REGULATION OF THE POWER UNIT OF THE NPP IN THE “T” MODE

Nowadays the most part of the electric power in Ukraine is manufactured at the nuclear power plants (52%). The contribution of thermal power plants is about 45%. The energy production from environmentally friendly power sources is about 7% of all produced energy in the country. The main objective of regulation of the steam power installation is supporting the equality between amounts of the produced end consumed energy. The discrepancy between the produced energy in the reactor and consumed energy in the turbine comes out (for dual circuit NPP) with the pressure and temperature change of the heat carries in the 1st circuit and pressure (temperature) of the saturated steam in the 2nd circuit. The specified discrepancy eliminate with the automatic output regulator of the power unit. The last one provides managing influence either on the reactor, or on the turbine depending on an operation mode of the power unit with the requirement that the reliability and safety of the power unit were not reduced and also that the economic efficiency of the power unit remained at the necessary level. The studying of the automated system of the output regulation of the power unit of the NPP in the “T” mode, will allow operating the power unit in the maneuverable modes of a daily cycle to maintenance the balance of power in Ukrainian power supply system.

Key words: NPP, energy, compromise program, regulation synthesis, mathematical model, SCADA Trace Mode.