

Полушкін Є.М.

Одеський національний політехнічний університет

Беглов К.В.

Одеський національний політехнічний університет

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

У енергосистемі України існує невідповідність між виробленням і споживанням електричної енергії протягом добового циклу, а сумарна частка установок, призначених для регулювання навантаження енергосистеми, дуже мала, тому актуальною є адаптація діючих енергоблоків атомних електростанцій до нових специфічних умов шляхом створення автоматизованої системи управління потужністю енергоблоку в маневрених режимах. Усі українські атомні електростанції з ВВЕР-1000 експлуатуються в режимі стабілізації потужності енергоблоку на заданому рівні, хоча обладнання першого контуру допускає експлуатацію в режимах маневрування потужністю.

Висока надійність і безпека енергоблоку – це основні вимоги, які пред'являються під час експлуатації енергоблоку в маневреному режимі. Запорукою надійної і безпечної експлуатації енергоблоку є стійкість реактора при збуреннях як під час роботи на постійному рівні навантаження, так і в маневреному режимі.

Під час роботи енергоблоку на постійному рівні потужності програма регулювання не грає важливої ролі. Однак в маневрених режимах вибір програми регулювання може мати вагомий вплив на експлуатаційні характеристики енергоблоку і роботу його обладнання.

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

Сьогодні регулювання потужності енергоблоку з реакторами ВВЕР здійснюється саме за допомогою автоматичного регулятора потужності реактора (АРП) і регулятора турбіни (РТ). Регулятор потужності реактора забезпечує такі режими роботи:

- режим астатичної підтримки теплотехнічного параметра (тиску пари перед турбіною) впливом на реактор («Т»);
- режим астатичної підтримки нейтронної потужності («Н»);
- режим підтримки теплотехнічного параметра за компромісною програмою впливу на реактор («К»);
- режим очікування підтримки теплотехнічного параметра впливом на реактор («С»).

Комбінована (компромісна) програма регулювання енергоблоків ВВЕР-1000 призначена для використання переваг інших програм. Програма регулювання з постійною середньою температурою теплоносія в першому контурі найбільш сприятлива для обладнання першого контуру, а програма регулювання з постійним початковим тиском пари в другому контурі – для парогенераторного обладнання та паропроводів другого контуру. Прагнення найбільшою мірою використовувати переваги кожної з цих програм регулювання, послабивши за можливості їх недоліки, призвело до того, що в деяких випадках використовують як компромісне рішення комбіновані програми регулювання.

Отже, стаття присвячена вивченню властивостей регулятора потужності.

Ключові слова: атомна електростанція (АЕС), енергія, автоматичний регулятор потужності, режим роботи, комбінована програма регулювання.

Постановка проблеми. У енергоблоці, що працює на електричну мережу, відбувається перетворення теплової енергії, що виробляється в ядерному реакторі, в механічну енергію вала турбіни і потім в електричну енергію в генераторі. Це показано на рис. 1.

Енергосистема України має невідповідність між виробленням і споживанням електроенергії, що видно на рис. 2.

Це пояснюється тим, що протягом доби споживання і вироблення електроенергії не відповідають одне одному. Отже, стає актуальною задача

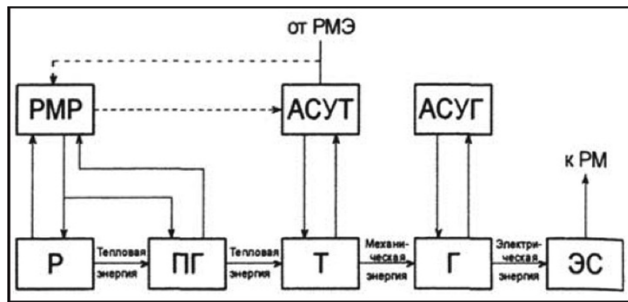


Рис. 1. Схема перетворення енергії та регулювання енергоблоку

підтримки балансу між споживанням і виробленням електроенергії протягом доби. Єдиним джерелом інформації про величину невідповідності вироблення електроенергії її споживанню є відхилення частоти в енергосистемі від її номінального значення. Завдання регулювання частоти і потужності в енергосистемі вирішують регулятори частоти і потужності турбіни і регулятор потужності енергосистеми. За незмінної частоти мережі потужність турбіни цілком певна, а для її зміни необхідно змінювати завдання регулятора частоти обертання. Для цього турбіни оснащені механізмом керування турбіною. Система автоматизованого управління потужністю енергоблоку включає регулятори тиску пари, частоти і потужності реактора і турбіни.

Сьогодні в енергосистемі України енергоблоки АЕС використовують для покриття базового навантаження в добовому графіку навантаження енергосистеми. Для покриття напівпікових і пікових навантажень енергосистеми використовують гідроакumuлюючі електростанції, однак нині цього недостатньо, тому необхідно або будувати більшу кількість гідроакumuлюючих електростанцій, але це неможливо, або використовувати енергоблоки АЕС в маневреному режимі для часткового регулювання електроенергії. Наприклад, розвантаження на 20% АЕС, на якій встановлено 6 блоків по 1000 МВт, дає такий самий ефект, що і повна зупинка блоку теплової електростанції 1200 МВт. Отже, маневруючи потужністю енергоблоку АЕС, можна буде підтримувати баланс потужності в енергосистемі України.

Режим маневрування реалізується за статичними програмами регулювання. Статичні програми регулювання – це залежності технологічних параметрів енергоблоку від потужності в ustalених режимах.

Під час експлуатації АЕС застосовують 4 основні статичні програми регулювання енергоблоків з ВВЕР-1000:

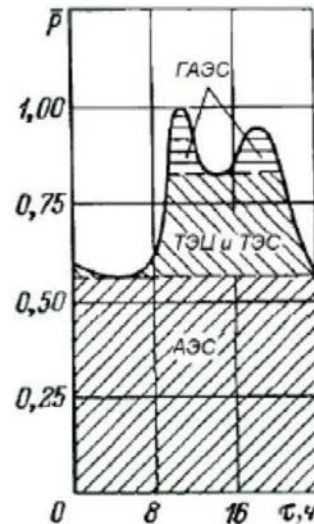


Рис. 2. Графік навантаження енергосистеми: τ – години доби, P – споживана потужність

- 1) програма регулювання потужності енергоблоку з постійною середньою температурою теплоносія в 1-му контурі;
- 2) програма регулювання потужності енергоблоку з постійним тиском у 2-му контурі;
- 3) компромісна (комбінована) програма регулювання потужності енергоблоку;
- 4) програма регулювання потужності енергоблоку за ковзним тиском у 2-му контурі.

Основне завдання регулювання паросилової установки – це підтримання рівності між кількістю виробленої і спожитої енергії. Невідповідність між вироблюваною енергією в реакторі і спожитою в турбіні проявляється (для двоконтурної АЕС) в зміні тиску і температури теплоносія в 1-му контурі і тиску (температури) насиченої пари в 2-му контурі. Зазначена невідповідність має усуватися регулятором потужності реактора (РПР), який керує або реактором, або турбіною залежно від режиму роботи енергоблоку. Таким чином, стаття присвячена дослідженню автоматичної системи регулювання (далі – АСР) потужності реактора.

Постановка завдання. Мета статті – моделювання АСР потужності енергоблоку АЕС з ВВЕР-1000 в режимі «К» для забезпечення надійності і безпеки енергоблоку. Для досягнення мети потрібно дослідити та порівняти ефективність кожного режиму регулювання потужності, а також створити структурну схему АСР потужності енергоблоку АЕС з ВВЕР-1000 за компромісною (комбінованою) програмою регулювання в середовищі Simulink.

Виклад основного матеріалу дослідження. Коли існує потреба вибору статичних програм

регулювання, враховують техніко-економічні показники, а також тривалість роботи енергоблоку на знижених рівнях потужності. Найбільшого поширення набули програми з постійним тиском пари в 2 контурі ($P_s = \text{const}$), а також з постійною середньою температурою теплоносія в 1 контурі (theorist) і компромісні програми.

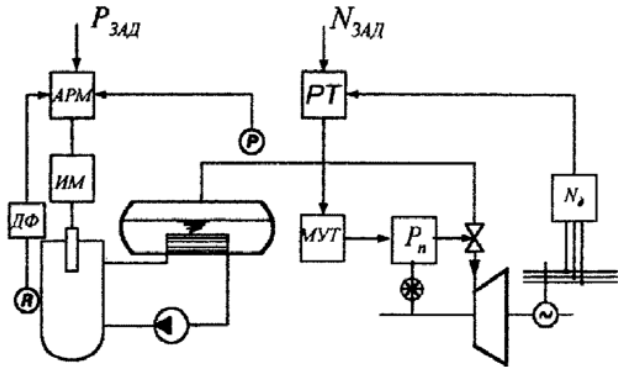


Рис. 3. Принципова схема регулювання потужності енергоблоку в режимі «Т»

Якщо енергоблок працює в базовому режимі, то потужність задається оператором регулятора турбіни (далі – РТ), який при відхиленні дійсної потужності від заданої впливає на механізм управління турбіною (далі – МУТ) і за допомогою регулятора частоти обертання турбіни P_n і регулюючого клапана змінює витрати пари на турбіну. Приведення у відповідність потужностей турбогенератора і реактора здійснюється регулятором реактора АРМ, який отримує сигнал тиску пари перед турбіною, порівнює його з сигналом заданого значення тиску і в разі їх невідповідності переміщує за допомогою виконавчого механізму (далі – ВМ) регулюючі стрижні реактора до відновлення заданого тиску. Для зміни потужності енергоблоку необхідно змінити задану потужність, при цьому потужність блоку змінюється зі швидкістю 10 МВт / хв. Можливі внутрішні перешкоди в реакторі нейтронного потоку сприймаються іонізаційними камерами, сигнал яких надходить на диференціатор ДФ, звідки сигнал швидкості надходить на АРМ. У статичному режимі сигнал на виході ДФ дорівнює нулю і АРМ підтримує задане значення тиску. Статична точність підтримки тиску становить $\pm 0,05$ МПа. Для забезпечення роботи енергоблоку в регулюючому режимі необхідно задану потужність блоку змінювати від регулятора частоти системи (на схемі не показано). Розглянемо роботу системи при збільшенні заданої потужності блоку. При цьому регулятор турбіни (РТ) впливає на МУТ, який через регулятор частоти обертання P_n від-

криває регулюючий клапан турбіни. Витрата пари при цьому зростає, статична характеристика турбіни зміщується вправо і турбогенератор за незмінної частоти мережі приймає нове навантаження. Збільшення витрати пари призводить до зменшення тиску перед турбіною, що сприймається регулятором АРМ, який через виконавчий механізм (ВМ) піднімає регулюючі стрижні. Це призводить до збільшення середньої температури теплоносія 1-го контуру, генерації пари в ПГ та відновлення тиску пари перед турбіною. Стабілізація тиску свідчить про відновлення енергетичного балансу між парогенеруючою установкою і турбогенератором.

Схема автоматичного регулювання енергоблоку в режимі «Н» зображена на рис. 4. Регулятор потужності реактора АРМ стабілізує нейтронну потужність впливом на керуючі стрижні. Тиск пари перед турбіною стабілізується регулятором турбіни (РТ) та впливом на МУТ регулятора частоти обертання P_n . Передбачено автоматичний перехід АРМ з режиму «Н» в режим «Т» у разі перевищення тиску пари в головному паровому колекторі заданого рівня для організації розвантаження реактора при різкому скиданні навантаження турбогенератора. Описана схема реалізує базовий режим роботи енергоблоку. Задана потужність енергоблоку підтримується з точністю $\pm 2\%$.

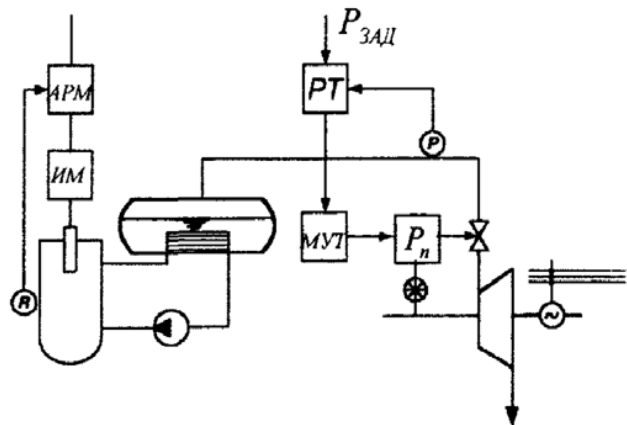


Рис. 4. Принципова схема регулювання потужності в режимі «Н»

Розглянемо роботу цієї системи при стрибкоподібному зменшенні частоти мережі. Це зменшення сприймається регулятором частоти обертання генератора P_n , який практично миттєво відкриває регулюючий клапан турбіни. Збільшення витрати пари при колишній паропроductивності ПГ призводить до зменшення тиску пари. Це зменшення тиску сприймається регулятором турбіни (РТ),

який через МУТ змщує статичну характеристику турбіни вправо, і за зниженої частоти обертання клапан займає попереднє положення, а тиск і потужність повертаються до первинних значень. Якщо регулятор частоти мережі відновить необхідну частоту в системі, то процеси регулювання в даній АСР пройдуть у зворотному порядку. Тимчасові відхилення тиску в ГПК можуть призвести до невеликої зміни середньої температури теплоносія 1-го контуру і через температурний ефект реактивності до зміни нейтронної потужності реактора. У такому разі протягом деякого часу працюватиме регулятор нейтронної потужності реактора.

Схема автоматичного регулювання енергоблоку в режимі «К» зображена на рис. 5. Вона реалізує компромісну програму. Регулятор реактора АРМ вимірює і стабілізує середню температуру теплоносія 1-го контуру впливом на приводи регулюючих стрижнів. Зміна тиску пари в 2-му контурі сприймається коригуючим регулятором тиску P_p , який через нелінійний елемент (обмежувач) змінює завдання регулятора середньої температури теплоносія. Зі зміною t_{cp} відновлюється тиск 2-го контуру.

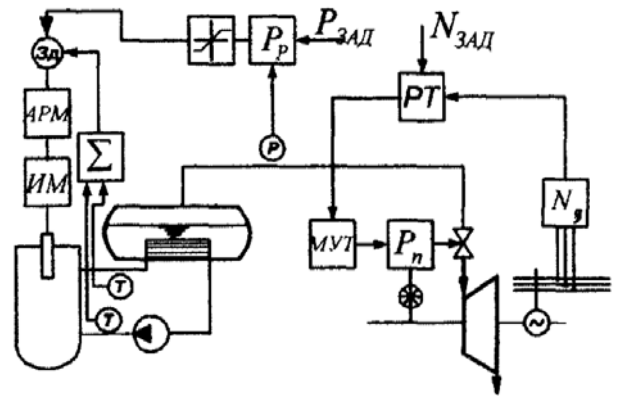


Рис. 5. Принципова схема регулювання потужності енергоблоку в режимі «К»

Отже, зі збільшенням потужності енергоблоку (через регулятор потужності турбіни) до певного її значення тиск пари перед турбіною залишається постійним і заданим, а середня температура теплоносія 1-го контуру зростає. Подальше підвищення потужності енергоблоку, що приводить до зниження тиску пари, не приводить через наявність обмеження до зміни завдання і середньої температури 1-го контуру. У такий спосіб реалізується 2-га ланка про-

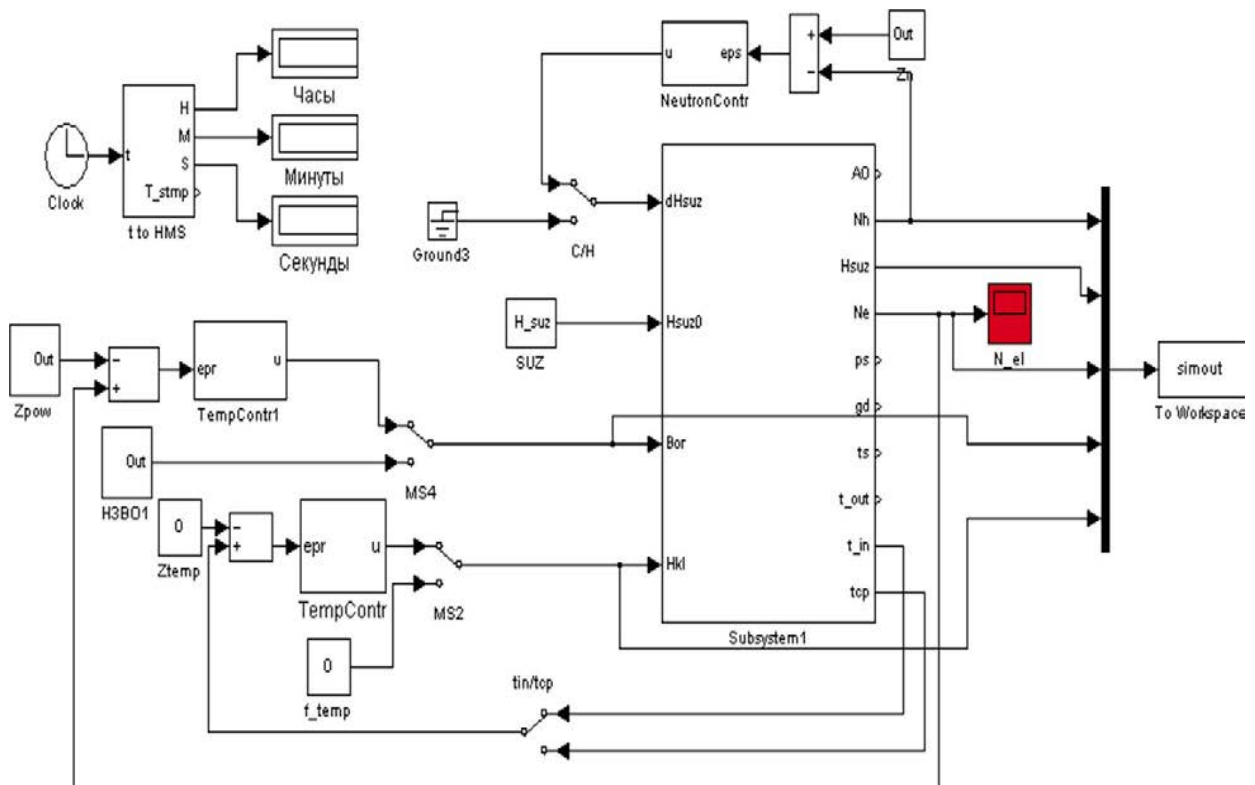


Рис. 6. Структурна схема АСР потужності енергоблоку АЕС з ВВЕР-1000 за компромісною (комбінованою) програмою регулювання в середовищі Simulink

грами регулювання, на якій тиск перед турбіною зменшується.

Беручи до уваги всі недоліки та переваги основних режимів роботи регулювання потужності реактора ВВЕР-1000, в середовищі Simulink ми змоделювали схему автоматичної системи регулювання потужності енергоблоку АЕС з ВВЕР-1000 за компромісною (комбінованою) програмою регулювання, яка представлена на рисунку 6.

Висновки. У роботі була розглянута проблема невідповідності між виробленням і споживанням електричної енергії протягом добового циклу. Сумарна частка установок,

призначених для регулювання навантаження енергосистеми, дуже мала. Також було зазначено, що нині актуальною є адаптація діючих енергоблоків атомних електростанцій до нових специфічних умов шляхом створення автоматизованої системи управління потужністю енергоблоку в маневрених режимах.

Було досліджено та порівняно ефективність кожного режиму регулювання потужності енергоблоку. Також у процесі роботи створено структурну схему АСР потужності енергоблоку АЕС з ВВЕР-1000 за компромісною (комбінованою) програмою регулювання в середовищі Simulink.

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. 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., Бєглов 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., Бєглов 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.

Polushkin Ye.M., Beglov K.V. SIMULATION ASR OF POWER OF THE POWER UNIT OF THE NPP WITH VVER-1000 IN MODE “K”

There is a mismatch between the Generation and Consumption of Electricity during the Daily Cycle in Ukraine's Power System, and the total Share of installations intended to regulate the loading of the grid is very small, so it is important to adapt the existing units of nuclear power plants to the New Specific Control Systems maneuver modes. All Ukrainian VVER-1000 Nuclear Power Plants are operated in power unit stabilization mode at a given Level, although the equipment of the first circuit allows operation in power maneuvering modes.

High reliability and safety of the power unit are the basic requirements that are achieved when maneuvering the power unit. Protected reliable and safe unit technology is an effective reactor when creating, both at the appropriate level and in maneuver mode.

When operating the unit at a constant power level, the control program does not play an important role. However, in maneuverable modes, the choice of the control program can have a significant impact on the performance of the unit and the operation of its equipment in the future.

The automatic power controller is an integral part of the power unit's power management system and is designed to maintain the reactor power according to the load of the turbine generator.

Currently, the control of the power of the unit with reactors VVER is carried out precisely with the help of an automatic reactor power regulator (ARP) and a turbine controller (RT). The reactor power controller provides the following operating modes:

- mode of astatic support of thermal parameter (steam pressure in front of turbine) influence on reactor (“T”);
- astatic Neutron Power (“H”) mode;
- mode of maintenance of the thermal parameter in the compromise program impact on the reactor (“K”);
- conservative mode of maintaining the thermal parameter by influencing the reactor (“C”).

The combined (compromise) control program of the VVER-1000 units is designed to take advantage of other programs. The control program with a constant average coolant temperature in the first circuit is most favorable for the equipment of the first circuit, and the control program with a constant initial steam pressure in the second circuit for the steam generating equipment and steam pipelines of the second circuit. The desire to make the most of the benefits of each of these regulatory programs, mitigating their weaknesses whenever possible, has led to the use in some cases of combined regulation as a compromise solution.

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

Key words: NPP, energy, automatic power controller, operating modes, combined adjustment program.