

УДК 621.039.56

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2020.2-1/28>**Сичило А.А.**

Одеський національний політехнічний університет

Беглов К.В.

Одеський національний політехнічний університет

Лисюк Г.П.

Одеський національний політехнічний університет

РОЗРОБКА АСР ПОТУЖНОСТІ ЕНЕРГОБЛОКУ АЕСЗ ВВЕР-1000 В РЕЖИМІ «Т» (ЧАСТИНА 2)

В енергосистемі України існує невідповідність між споживанням і виробленням електроенергії протягом доби. Сумарна частка установок, призначених для регулювання добового графіка навантаження енергосистеми, дуже мала, тому актуальною стає задача адаптації діючих АЕС до нових специфічних умов роботи. Основним завданням регулювання паросилової установки є підтримка рівності між кількістю виробленої і споживаної енергії. Невідповідність між виробленою енергією в реакторі і споживаною в турбіні проявляється (для двокоонтурної 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, котрий 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. На цей час регулювання потужності енергоблоку з реакторами ВВЕР здійснюється саме за допомогою автоматичного регулятора потужності реактора (АРП) і регулятора турбіни (РТ). Регулятор потужності реактора забезпечує наступні режими роботи:

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

Розроблено автоматизовану систему регулювання потужності енергоблоку АЕС в режимі «Т», який дозволить експлуатувати енергоблок у маневрених режимах добового циклу для підтримки балансу потужності в енергосистемі України.

Ключові слова: АЕС, енергія, автоматичний регулятор потужності, синтез регулювання, режими роботи, комбінована програма регулювання.

Постановка проблеми. На цей час всі українські АЕС з ВВЕР-1000 експлуатуються в режимі стабілізації потужності енергоблоку на заданому рівні, хоча обладнання першого контуру розраховане на експлуатацію в режимі маневрування потужністю. Це пов'язано з тим, що на цей час маневрування потужністю реакторної установки (РУ) здійснюється оператором у ручному режимі і тільки на вимогу диспетчерів енергосистеми. Виконання маневру операторами РУ в ручному режимі дуже небезпечно, оскільки під час управління необхідно одночасно контролювати зміни багатьох нейтронно-фізичних і технологічних параметрів, що призводить до необхідності враховувати вплив людського фактора на безпеку АЕС.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Стаття на тему «Автоматизована система регулювання потужності енергоблоку для управління ЯЕУ в маневрених режимах з постійною температурою входу в реактор» [1, с. 20–21] сказано, що для підтримки балансу потужності в енергосистемі необхідно щодоби або щотижня здійснювати зміну потужності енергоблоку з мінімальною участю оператора. Тому актуальною є задача розробки АСР потужності енергоблоку, яка б здійснювала розвантаження / навантаження енергоблоку в автоматизованому режимі.

Постановка завдання. Метою роботи є удосконалення існуючої автоматичної системи регулювання потужності енергоблоку АЕС з ВВЕР-1000, яка дозволить з дотриманням

регламентних вимог, без зниження рівня безпеки, експлуатувати енергоблок у маневрених режимах добового або тижневого циклу.

Виклад основного матеріалу дослідження.

В енергоблоці, що працює на електричну мережу, відбувається перетворення теплової енергії, що виробляється в ядерному реакторі, на механічну енергію валу турбіни і потім на електричну енергію в генераторі. Основне завдання регулювання паросилової установки – підтримання рівності між кількістю виробленої і споживаної енергії. Невідповідність між вироблюваною енергією в реакторі і споживаною 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 надає керуючий вплив або на реактор, або на турбіну залежно від режиму роботи енергоблоку.

Потужність енергоблоку є заданою величиною, при цьому вона може бути постійною

під час роботи енергоблоку в базовому режимі або змінною під час роботи в регулюючому режимі. Енергоблоки працюють на енергосистемі з великою кількістю споживачів електроенергії (рис. 1). Динамічні процеси в генераторі практично безінерційні, тому електрична потужність, що віддається в енергосистемі (за винятком втрат енергії в генераторі), дорівнює механічній енергії на роторі турбіни. Основне завдання регулювання енергосистеми полягає в тому, щоб виробляти вироблення електроенергії точно відповідно до еволюційного споживання. По суті, єдиним джерелом інформації про величину невідповідності вироблення електроенергії її споживання є відхилення частоти в енергосистемі від її номінального значення. Відхилення частоти від номінального значення (50 Гц) допускається в вузьких межах $\pm 0,5$ Гц. Навіть в аварійних режимах енергосистеми можлива лише короткочасна робота з частотами: від 51 до 50,5 Гц – 60 з на рік, але не більше 10 з одноразово; від 49 до 48 Гц – 12 хв. на рік, але не більше 2-х хв. одноразово; від 48 до 47 Гц – 6 хв. на рік, але не більше 1 хв. одноразово; від 47 до 46 Гц – 60 з на рік, але не більше 10 з одноразово.

Завдання регулювання частоти і потужності в енергосистемі вирішують регулятори частоти і потужності турбіни (АСУ ТП) і регулятор потужності енергосистеми (РПЕ). Структура системи управління потужністю енер-

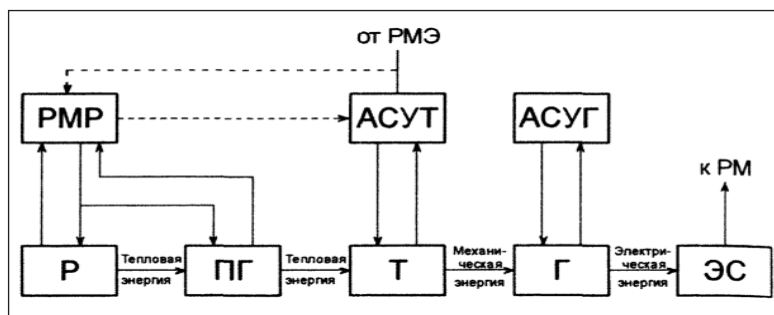


Рис. 1. Схема перетворення енергії та регулювання енергоблоку

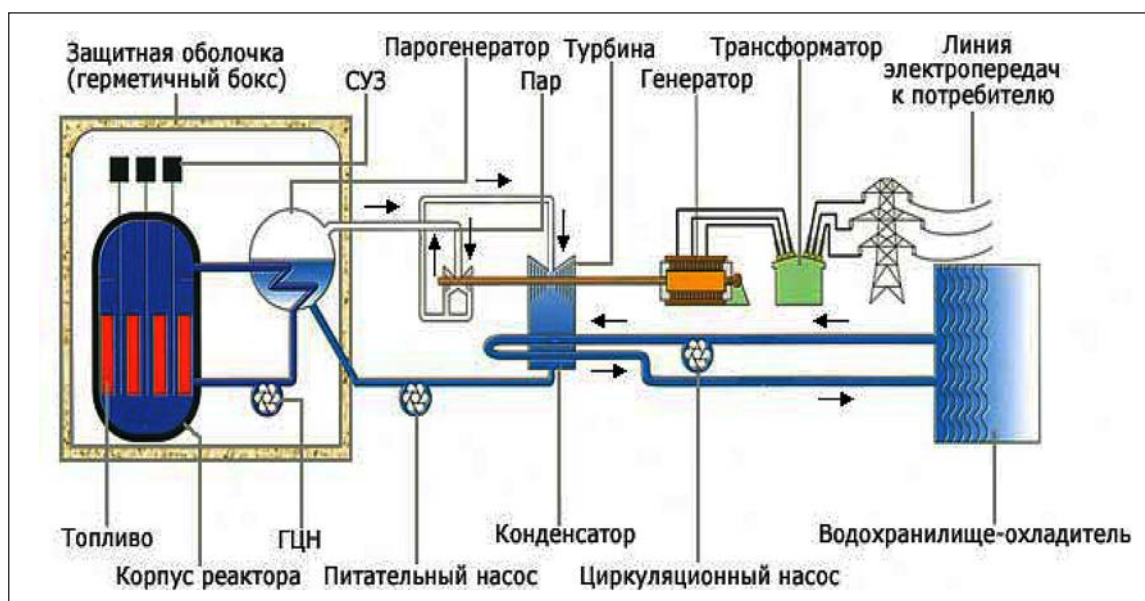


Рис. 2. Технологічна схема енергоблоку з реактором ВВЕР-1000

гоблоку значною мірою визначається графіком електричного навантаження енергосистеми і енергоблоку. Однак цей графік дає усереднене значення навантаження, тоді як дійсне енергоспоживання може в певних межах змінюватися, що вимагає (як уже зазначалося) постійного регулювання частоти. Для цього необхідні невеликі (до 5%), але досить швидкі (до 10% на хв.) зміни потужності відповідно до реального користування електроенергією. Для двоконтурних енергоблоків важливим є характер зміни параметрів робочих середовищ за контурами (тиск, температура, витрата) за зміни потужності в статичних режимах роботи (так звана програма регулювання). Вибір статичної програми регулювання залежить від багатьох фізичних, конструктивних, техніко-економічних особливостей енергоблоку і режиму використання його в енергосистемі.

Обрана програма регулювання реалізується за допомогою системи управління енергоблоком. При цьому статична програма регулювання підтримується тільки в стаціонарних режимах роботи енергоблоку і лише приблизно реалізується в численних перехідних процесах. Найбільшого поширення набули двоконтурні енергоблоки з водо-водяними енергетичними реакторами ВВЕР (рис.2). Для таких реакторів теплова потужність, яка знімається однофазним теплоносієм (водою) з активної зони реактора, $N = GCp$ ($t_{вих} - t_{вх}$) = $GCp\Delta t$, де G – витрата теплоносія; Cp – середня питома теплоємність теплоносія; $t_{вх}$, $t_{вих}$ – температура теплоносія на вході і виході реактора відповідно.

Для реакторів ВВЕР витрата теплоносія 1-го контуру постійна і не залежить від потужності. Можна також вважати, що $Cp = const$. У цьому разі потужність реактора лінійно залежить від різниці температур теплоносія, тобто $N = k\Delta t$. За вільно обраного закону зміни $t_{вх}$ однозначно визначається закон зміни $t_{вих}$ і навпаки. Під час 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 перед турбіною і постійною середньою температурою теплоносія в 1-му контурі.

Автоматичний регулятор потужності АРП є складовою частиною системи регулювання

потужності енергоблоку (рис. 3) 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)

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

Розглянемо переваги та недоліки програми.

З постійним тиском пара в 2-гому контурі $P_s = const$ (рис. 4).

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

Недоліки: зміна реактивності внаслідок зміни середньої температури теплоносія; значні зміни температурного стану компонентів АЗ при переході на новий рівень потужності; мінливість об'єму теплоносія. Коли стає вибір 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 ($P_s = const$), з постійною середньою температурою теплоносія в 1 контурі (theorist) і компромісні

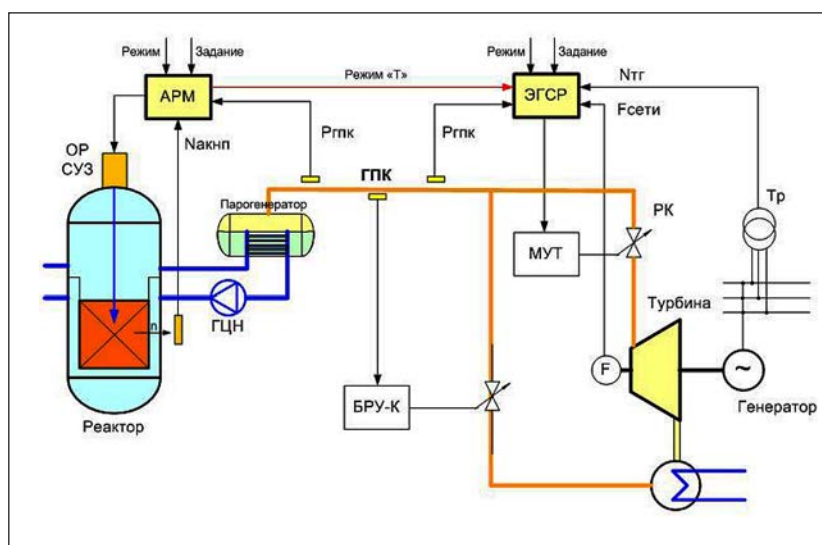


Рис. 3. АРП в системі регулювання енергоблоку АЕС з ВВЕР

програми. Схема автоматичного регулювання енергоблоку в режимі «Т» зображена на (рис. 5).

Якщо енергоблок працює в базовому режимі, то потужність задається оператором регулятора турбіни РТ, який у разі відхилення дійсної потужності від заданої впливає на механізм управління турбіною МУТ і за допомогою регулятора частоти обертання турбіни Рп і регулюючого клапана змінює витрату пари на турбіну. Приведена у відповідність потужність 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 ІМ 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 обурення в реакторі за нейтронним потоком сприймаються іонізаційними камерами, сигнал камер надходить на дифференціатор 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 під час збільшення заданої потужності блоку. При цьому регулятор турбіни РТ впливає на МУТ, який через регулятор частоти обертання Рп відкриває 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 падіння тиску перед турбіною, що сприймається регулятором АРМ, який через виконавчий механізм ВМ піднімає регулюючі стержні. 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.

Беручи до уваги всі недоліки та переваги основних режимів роботи регулювання потужності реактора ВВЕР-1000, в середовищі Simulink була змодельована схема автоматичної системи регулювання потужності енергоблоку АЕС з ВВЕР-1000 (рис. 6).

Привода 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 шляхом скидання ОР під час знеструмлення приводів.

За даними випробувань, час падіння ОР СУЗ в активній зоні становить від 2 до 4 сек. 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.

Висновки. У роботі була розглянута проблема невідповідності між виробленням і споживанням електричної енергії протягом добового циклу, і що сумарна частка установок, призначених для регулювання навантаження енергосистеми, дуже мала. Було підмічено, що для підтримки балансу потужності в енергосистемі необхідно щодоби або щотижня здійснювати зміну потужності енергоблоку з мінімальною участю оператора. Задача розробки АСР потужності енергоблоку, яка б розвантажувала / навантажувала енергоблок здійснювала в автоматизованому режимі, виконана.

Було досліджено та порівняно ефективність режиму «Т» та створена структурна схема АСР потужності енергоблоку АЕС з ВВЕР-1000 за програмою регулювання в середовищі Simulink.

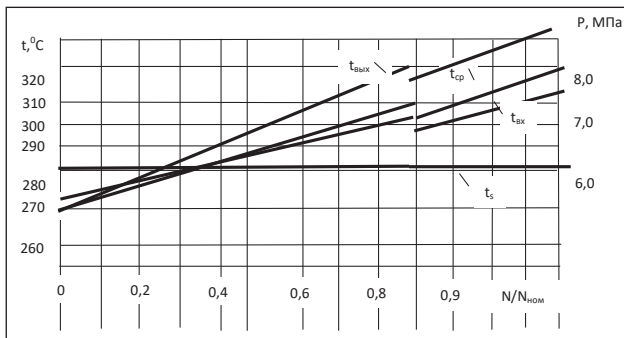


Рис. 4. Статична програма $P_s = \text{const}$

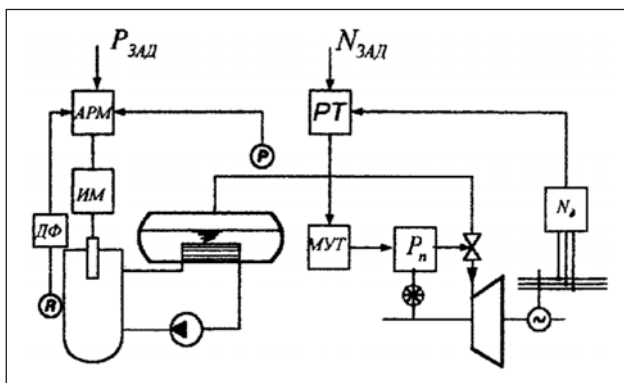


Рис. 5. Принципова схема регулювання потужності енергоблоку в режимі «Т»

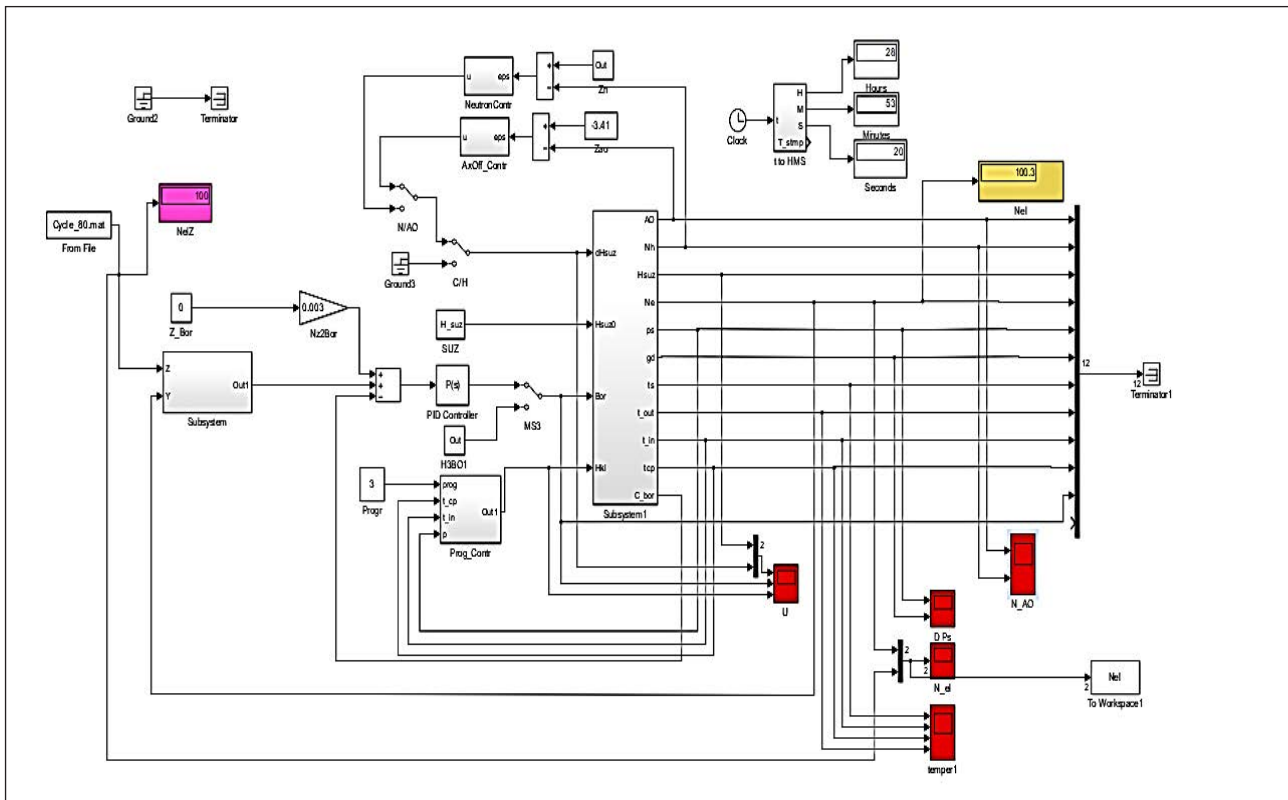


Рис. 6. Структурная схема АСР з регулятором тиску

Список літератури:

1. Теплотехнічний довідник. В двох томах. Том 2, Ред. В. Юрнев, П. Лебедев: Видавництво «Енергія», 1976 р.
2. Тодорцев Ю.К., Цисельская Т.А., Никольский М.В. Автоматизована система регулювання потужності енергоблоку для управління ЯЕУ в маневрених режимах з постійною температурою входу в реактор. *Ядерна та радіаційна безпека*. Вип. 4(60), 2013.
3. Автоматичні системи регулювання технологічними процесами АЕС. В.А. Демченко. ОНПУ 1994 р.
4. Методичні вказівки з курсового проектування з дисципліни «Автоматичні системи управління технологічними процесами об'єктів АЕС». Одеса, 1988 р.
5. Методичні вказівки з курсового проектування з дисципліни «Автоматичні системи управління технологічними процесами об'єктів АЕС», «Регулювання енергоблоків». Одеса: ОНПУ, 1994 р.

Sychylo A.A., Beglov K.V., Lysyuk H.P. DEVELOPMENT OF THE AUTOMATED SYSTEM OF THE OUTPUT REGULATION OF THE POWER UNIT OF THE NPP IN THE “T” MODE (PART 2)

In the power system of Ukraine there is disparity between a consumption and making of electric power within 24 hours. The total proportion of installations designed to regulate the daily load schedule of the power system is very small, therefore, the task of adapting the existing NPP becomes actual to the new specific terms of work.

The main task of regulating the steam power plant is to maintain equality between the amount of energy produced and consumed. Disparity between productive energy in a reactor and consumed in a turbine shows (for dual circuit NPP) up with the change of pressure and temperature of coolant moderator in the 1st circuit and pressure (temperatures) of the saturated pair in the 2nd circuit. The indicated disparity must remove an automatic regulator to power of power unit. That gives managing influence or on a reactor, or on a turbine depending on the mode of operations of power unit with a requirement, that reliability and safety of power unit were reduced, and also, that economic efficiency of power unit was kept on a necessity levels. 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).*

Development of an automated power unit power control system NPP is in the mode of “T”, that will allow to exploit power unit in the manoeuvre modes of day’s cycle for support of balance of power in the power system of Ukraine.

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