

УДК 621.311

А.А. МАКОВИЙЧУК**АНАЛІЗ МОДЕЛІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ДВОМОДУЛЬНОЇ АЕС З РЕАКТОРАМИ ЧЕТВЕРТОГО ПОКОЛІННЯ ТИПУ НТР**

Проведено аналіз технологічної частини АЕС з модульним реактором типу НТР. Виявлено основні проблеми дослідження маневреності та стабільної роботи АЕС з модульними реакторами. Створена динамічна модель в середовищі MATLAB/Simulink для АЕС типу НТР-РМ з двома реакторними модулями для дослідження основних законів управління реакторними модулями та координації модулів. Отримані результати моделювання підтверджують стабільну роботу мультимодальної АЕС під час поетапного зниження потужності першого та другого модулів.

Ключові слова: двомодульна АЕС, координація модулів, зворотний зв'язок, система управління, алгоритм регулювання, динамічне моделювання

А.А. МАКОВИЙЧУК**АНАЛИЗ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВУХМОДУЛЬНОЙ АЭС С РЕАКТОРАМИ ЧЕТВЕРТОГО ПОКОЛЕНИЯ ТИПА НТР**

Проведен анализ технологической части АЭС с модульным реактором типа НТР. Выявлены основные проблемы исследования маневренности и стабильной работы АЭС с модульными реакторами. Создана динамическая модель в среде MATLAB / Simulink для АЭС типа НТР-РМ с двумя реакторными модулями для исследования основных законов управления реакторными модулями и координации модулей. Полученные результаты моделирования подтверждают стабильную работу мультимодальной АЭС во время поэтапного снижения мощности первого и второго модулей.

Ключевые слова: двухмодульная АЭС, координация модулей, обратная связь, система управления, алгоритм регулирования, динамическое моделирование

А.А. МАКОВИЙЧУК**ANALIZING OF CONTROL SYSTEM MODEL OF TWO-MODULAR NUCLEAR POWER PLANT WITH GENERATION 4 REACTORS TYPE НТР**

The analysis of the technological part of the nuclear power plant with a modular reactor of the НТР type was carried out. The main problems of studying the mobility and stable operation of nuclear power plants with modular reactors are revealed. A dynamic model was created in the MATLAB/ Simulink environment for the НТР-РМ type nuclear power plant with two reactor modules for studying the basic laws governing reactor modules and coordinating modules. The obtained simulation results confirm the stable operation of the multi-module nuclear power plant during the stage-by-stage reduction of the power of the first and second modules. The high-temperature gas-cooled reactor is a reliable concept for the fourth generation modular reactor, which can be considered as the basic option for further development of the nuclear energy sector of Ukraine.

Keywords: two-modular NPP, module coordination, feedback, control system, control algorithm, dynamic modeling

Вступ.

Високотемпературний газоохолоджувальний реактор (НТР) – надійна концепція модульного реактору четвертого покоління, що може розглядатися як базовий варіант для подальшого розвитку ядерного сектору енергетики України. Завдяки високій температурі теплоносія на виході реактора, НТР можна застосовувати не тільки для виробництва електроенергії, але й як джерело тепла для промислових комплексів. Даний тип реактору має мультимодульну схему - на одну турбіну можливо підключати від двох ядерних реакторів до восьми, тобто перегріті потоки пари, що виробляються в модулях на основі ядерної розпаду, об'єднуються в турбіні для керування загальним тепловим навантаженням. Оскільки технологія контролю потужності традиційних одномодульних атомних станцій не може бути безпосередньо застосована до мультимодульних АЕС, необхідно провести аналіз методу управління потужністю мультимодульних установок, що пропонується для використання на протопитній АЕС типу НТР-РМ, що споруджується в Китаї.

В даній роботі узагальнено дослідження проблеми управління потужністю для двомодульного блоку НТР-РМ та отримані результати верифікації, що базуються на чисельному моделюванні.

Загальна концепція системи управління АЕС з реактором типу НТР. Система управління технологічними процесами - це ключова методика забезпечення безпечної, стабільної та ефективної роботи кожної атомної станції та збалансування процесів енергопостачання та попиту. Оскільки два модулі реакторів АЕС типу НТР-РМ об'єднані спільною вторинною петлею, включаючи турбінний / генераторний режими, і оскільки розташовані поруч два модулі тісно пов'язані один з одним трубопроводами (основні та допоміжні магістралі), доволі складно спроектувати стратегію керування потужністю для двомодульної АЕС, ніж для традиційної одномодульної. Крім того, установка НТР-РМ є, по суті, нелінійною системою з великою місткістю та множинними входами, складність якої через динаміку безумовно призводить до ускладнення стратегії управління АЕС в цілому.

Як правило, використовується єдиний контрольний контур для регулювання кожного параметру процесу, такого як первинний потік, витрата живильної води, температури гелію та температури пари. Оскільки поєднання всіх цих одноконтрольних петель глибоко впливає на динамічну поведінку установки в цілому, необхідно узгодити ці керуючі петлі для задовільної стабільності роботи моделі.

© А.А. Маковійчук, 2018

Проект системи управління. Система управління АЕС з реакторами типу НТР має дві основні складові, проект контурів зворотного зв'язку та проект основного закону управління, які тісно пов'язані один з одним. Основним методом проектування системи управління технологічними процесами АЕС обрано метод аналізу відносного посилення. У цій роботі як петлі зворотного зв'язку, так і закон управління системи керування НТР-РМ розроблені за допомогою методів, запропонованих в [1-7] та методу координації модулів, запропонованих в [8, 9], які забезпечують глобально асимптотичну замкнуту стабільність через, що гарантує збільшення кінетики нейтронів, а також кінетичною енергією, що зберігається у вторинній петлі АЕС.

В даній роботі розглядається проект системи управління прототипної АЕС типу НТР-РМ, що споруджується в Китаї.

Управління ядерними модулями. Два ядерні модулі створюють складну нелінійну динамічну систему. Щоб забезпечити точні значення вихідного результату, необхідно надати належні закони управління для ядерного модуля.

Нещодавно, для АЕС з реакторами НТР, була запропонована нова модель управління [9], яка забезпечує глобальну асимптотичну стійкість для ядерного модуля, якщо температура живильної води є сталою, а витрата гелію та витрати живильної води добре регулюється. Ця стратегія управління ядерним модулем може бути реалізована за допомогою циклів зворотного зв'язку та простих законів управління.

Завдяки мультимодульності схеми можливо створити АЕС бажаної потужності лише змінивши кількість модулів. Контроль координації модулів є однією з найважливіших характеристик мультимодулярної атомні станції, такої як НТР-РМ.

В [8] з'ясовано, що проблема координації модулів, по суті, є задача регулювання тиску вторинної петлі.

Контроль реакторних модулів забезпечують контролери для регулювання ядерної потужності, витрати потоку гелію, температури гелію на виході реактора, температури пари та вихідної теплової потужності реактору.

Загальна модель системи управління блоку АЕС з двома модулями наведена на рис.1 [9], основні параметри моделі наведені в табл.1 [9].

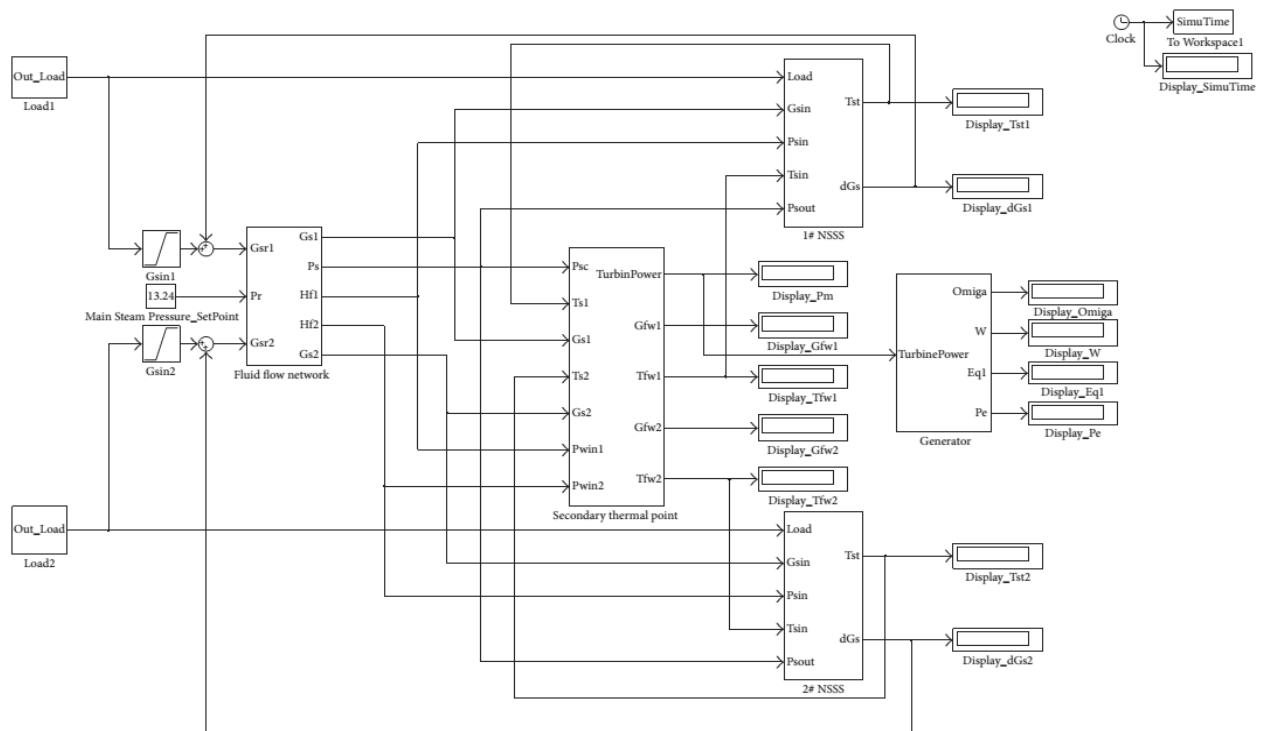


Рис. 1 – Модель системи управління блоку АЕС з реакторами типу НТР створена в Simulink

$$G_{HF}(s) = \frac{u_{HF}(s)}{W_{H,e}(s)} = k_{hf,p} + \frac{k_{hf,i}}{s}, \quad (2)$$

де $k_{hf,p}$ - пропорційний коефіцієнт зворотного зв'язку;

$k_{hf,i}$ - інтегральний коефіцієнт зворотного зв'язку;

u_{HF} - швидкість обертання первинної гелієвої повітродувки;

$W_{H,e}$ - помилка між посиланнями та фактичними значеннями витрати первинного гелію.

Загальна ефективність системи управління АЕС спирається на дві основні складові, ефективність системи управління модулями, та координація модулів. Перший - гарантується підходом контролю фізичних процесів реактору, другий забезпечується методом контролю тиску потоку. Усі закони управління приймаються за формами [1-7] як закони зворотного зв'язку з ПІ або ПД. Для законів керування ПІ, пропорційний коефіцієнт збільшений. Більш того, інтегральний коефіцієнт посилення більший, а перехідний період до стаціонарного стану коротший, але перебільшення більше. Зазвичай, пропорційний коефіцієнт вибирається не більше 1,0, а інтегральний коефіцієнт підсилення вибирається не більше 0,1. Для

закону ПД для регулювання виробки ядерної енергії пропорційний коефіцієнт вибирається не більше 0,5, а диференціальний коефіцієнт вибирається не більше, ніж 3,0.

Результати моделювання. Динамічні реакції зміни потужності від 100% до 95% від повної потужності блоку АЕС отримуються шляхом чисельного моделювання.

Моделювання проведено в програмному комплексі MATLAB в середовищі Simulink на основі моделі, наведеній на рис.1.

Вихідний режим - установка НТР-РМ залишається в стаціонарному стані, потужність 100%, що означає, що два модулі працюють на повній потужності 100% реактора.

При 5000 с, задана величина теплової потужності першого модуля знижується зі 100% до 95%, а потім в 10 000 с, згадана тепла потужність другого модуля знижується від 100% до 95%. Динамічні реакції відносних ядерних сил, температура гелію на виході реактора, температура вихідної пари та теплові потужності модулів 1 та 2 наведені на рис. 2. Відгуки витрат $Q_i (i = 1, 2, 3)$, тиск живильної води $-H_{fk} (k = 1, 2)$ і основний тиск пари, наведені на рис. 3.

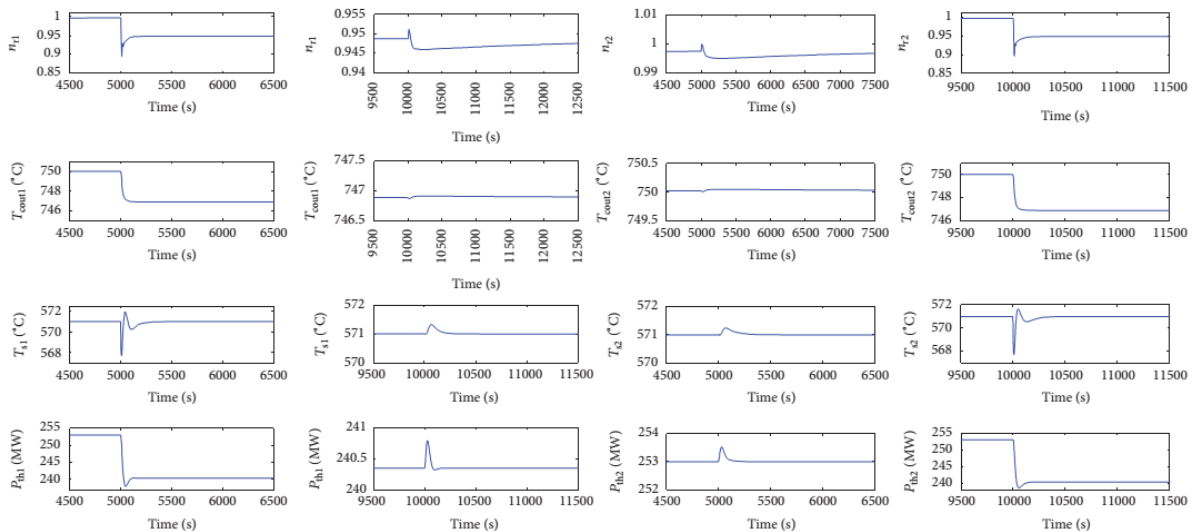


Рис. 2 – Відгуки в системі при зниженні потужності першого та другого модулів

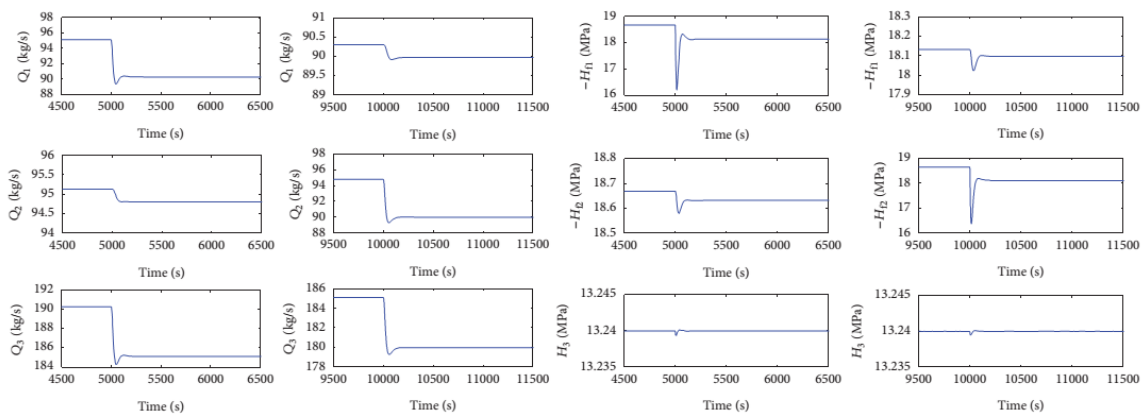


Рис. 3 – Реакції вторинного контуру і падіння тиску в разі зниження потужності модулів

Висновки. Завдяки властивій безпеці та потенційній економічній привабливості, високотемпературний реактор з газовим охолодженням четвертого покоління вже розглядається як один з найкращих кандидатів на будівництво атомних станцій нового покоління. Реактор типу НТР один з найкращих варіантів для подальшого будівництва АЕС в Україні.

В даній роботі розглянуто динамічне моделювання основних елементів прототипної АЕС НТР-РМ, проаналізовано систему контролю, включаючи цикли зворотного зв'язку та запропоновані закони управління. Моделювання процесів було проведено в середовищі MATLAB / Simulink.

Моделювання проведено для випадку зменшення потужності модулів, підтверджено, що обрана стратегія системи управління АЕС забезпечує задовільну стабільність замкнутого циклу та перехідні характеристики для АЕС НТР-РМ.

Подальше дослідження буде полягати в дослідженні інших нестационарних режимів, що можуть виникати під час експлуатації модульного блоку АЕС.

Список літератури

1. Z. Dong, J. Feng, X. Huang, and L. Zhang, "Power-level control of nuclear reactors based on feedback dissipation and backstepping," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol.57, no. 3, pp. 1577–1588, 2010.
2. Z. Dong, "Nonlinear state-feedback dissipation power level control for nuclear reactors," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol.58, no.1, pp.241–257, 2011.
3. Z. Dong, "Physically-based power-level control for modular high temperature gas-cooled reactors," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol.59, no.5, pp.2531–2549, 2012.
- Z. Dong, "Power-level control for MHTGRs with time-delay in helium temperature measurement," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol.61, no.3, pp.1349–1359, 2014.
4. Z. Dong, "Model-free power-level control of MHTGR against input saturation and dead-zone," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol.62, no.6, pp.3297–3310, 2015.

5. Z. Dong, X. Huang, and L. Zhang, "Saturated output feedback dissipation steam temperature control for the OTSG of MHTGRs," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol.58, no.3, pp. 1277–1289, 2011.
6. Z. Dong, "Model-free coordinated control for MHTGR-based nuclear steam supply systems," *Energies*, vol.9, no.1, article37, 2016.
7. G. R. Ansarifard and H. R. Akhavan, "Sliding mode control design for a PWR nuclear reactor using sliding mode observer during load following operation," *Annals of Nuclear Energy*, vol. 75, pp. 611–619, 2015.
8. Y. B. Shtessel, "Sliding mode control of the space nuclear reactor system," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 34, no. 2, pp. 579–589, 1998.

References (transliterated)

1. Z. Dong, J. Feng, X. Huang, and L. Zhang, "Power-level control of nuclear reactors based on feedback dissipation and backstepping," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol.57, no. 3, pp. 1577–1588, 2010.
2. Z. Dong, "Nonlinear state-feedback dissipation power level control for nuclear reactors," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol.58, no.1, pp.241–257, 2011.
3. Z. Dong, "Physically-based power-level control for modular high temperature gas-cooled reactors," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol.59, no.5, pp.2531–2549, 2012.
- Z. Dong, "Power-level control for MHTGRs with time-delay in helium temperature measurement," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol.61, no.3, pp.1349–1359, 2014.
4. Z. Dong, "Model-free power-level control of MHTGR against input saturation and dead-zone," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol.62, no.6, pp.3297–3310, 2015.
5. Z. Dong, X. Huang, and L. Zhang, "Saturated output feedback dissipation steam temperature control for the OTSG of MHTGRs," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol.58, no.3, pp. 1277–1289, 2011.
6. Z. Dong, "Model-free coordinated control for MHTGR-based nuclear steam supply systems," *Energies*, vol.9, no.1, article37, 2016.
7. G. R. Ansarifard and H. R. Akhavan, "Sliding mode control design for a PWR nuclear reactor using sliding mode observer during load following operation," *Annals of Nuclear Energy*, vol. 75, pp. 611–619, 2015.
8. Y. B. Shtessel, "Sliding mode control of the space nuclear reactor system," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 34, no. 2, pp. 579–589, 1998.

Надійшло (received) 11.04.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Маковійчук Анатолій Анатолієвіч (Маковийчук Анатолий Анатолієвич Makoviychuk Anatoliy Anatoliyich) – студент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел.: 0930681330; e-mail: Jokereee2412@mail.ru.

Укладач: С. О. Федорчук, аспірант.