

Синтез систем керування енергоблоку атомної електростанції методами векторної оптимізації

В. П. Северин¹

Анотація – Problems of synthesis of automatic control systems based on the methods of vector optimization of direct quality indices and improved integral quadratic estimate are presented. Mathematical models of control systems for power unit of nuclear electric station for normal modes are constructed. The results of synthesis of optimal PID and fuzzy controllers are presented.

Ключові слова – атомні електростанції, енергоблок, системи керування, параметричний синтез, векторна оптимізація.

I. ВСТУП

У зв'язку із цьогорічною аварією на японській атомній електростанції (АЕС) «Фукусіма-1», інтерес суспільства до світової атомної енергетики знову виріс, як і після ядерної катастрофи у Чорнобилі. У наш час альтернативи атомній енергетиці не існує, тому необхідно підвищувати безпеку діючих та перспективних АЕС [1]. В Україні експлуатуються енергоблоки з реакторами ВВЕР-1000, запроси експлуатації яких вимагають підвищення якості керування енергоблоками. Потенційна небезпека аварій на АЕС викликає необхідність приділяти особливу увагу якості перехідних процесів при зміні режимів роботи енергоблоків. Мета доповіді полягає в представленні результатів багатокритеріального параметричного синтезу систем автоматичного керування (САК) енергоблоку АЕС з ядерним реактором ВВЕР-1000 для нормальних режимів експлуатації на основі використання методів векторної оптимізації показників якості перехідних процесів в САК.

II. ЗАДАЧІ ТА МЕТОДИ ВЕКТОРНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ

Критерії якості САК визначаються за стандартними математичними моделями систем, які можна записати у просторі станів або у вигляді передавальної функції [1, 2]:

$$dX/dt = A(x)X + B(x)u, \quad y = C(x)X, \quad (1)$$

$$dX/dt = f(x, X, u), \quad y = C(x)X, \quad (2)$$

$$W(x, s) = \beta(x, s)/\alpha(x, s), \quad (3)$$

$$\beta(x, s) = \sum_{i=0}^m \beta_i(x) s^{m-i}, \quad \alpha(x, s) = \sum_{i=0}^n \alpha_i(x) s^{n-i},$$

де $x = (x_1, x_2, \dots, x_p)$ – вектор змінних параметрів задачі синтезу САК. В задачі параметричного синтезу враховані умови можливості технічної реалізації САК та стійкості:

$$a_i \leq \overline{x_i} \leq b_i, \quad i = \overline{1, p}, \quad (4)$$

$$\alpha_i(x) > 0, \quad i = \overline{0, n}; \quad \rho_k(x) > 0, \quad k = \overline{2, n-1}, \quad (5)$$

де $\rho_k(x)$ – елемент першого стовпця таблиці Рауса. За цими умовами формується допустима область D .

Для оцінки якості САК використовуються прямі показники якості (ППЯ): перерегулювання $\sigma(x)$, показники коливань – розмах коливань $\zeta(x)$ та показник загасання коливань $\lambda(x)$, час регулювання $t_c(x)$ та його відносне значення $\tau(x) = t_c(x)/T_f$, де T_f – час спостереження перехідного процесу [1].

Сформовані три задачі синтезу САК енергоблоку.

1. Задача забезпечення бажаного еталонного часу регулювання t_e монотонного перехідного процесу:

$$\min [\tau(x) - t_e/T_f]^2, \quad x \in D, \quad \sigma(x) = 0, \quad \zeta(x) = 0. \quad (6)$$

2. Задача мінімізації покращеної інтегральної квадратичної оцінки (ІПКО):

$$\min I(x), \quad x \in D, \quad I(x) = \int [z(x, t) + \tau_1 dz(x, t)/dt]^2 dt, \quad (7)$$

де z – відхилення керованої змінної від її сталого значення, $\tau_1 = t_e/\tau_e$, $\tau_e = 2,995729s$.

3. Задача максимальної швидкодії САК:

$$\min \tau(x), \quad x \in D, \quad \sigma(x) \leq \sigma_m, \quad \zeta(x) \leq \zeta_m, \quad \lambda(x) \leq \lambda_m, \quad (8)$$

де σ_m , ζ_m і λ_m – задані допустимі значення ППЯ.

Для утримання процесу синтезу в допустимій області сформована векторна штрафна функція, перша проекція якої – функція рівня відповідає кількості виконаних обмежень, а друга проекція – функція штрафу представляє штраф порушеного обмеження. На основі векторної штрафної функції для задач синтезу (6)-(8) сформовані векторні цільові функції з врахуванням пріоритету умов (4), (5) та показників якості [1].

Для оптимізації векторних цільових функцій задач синтезу САК створена комп'ютерна лабораторія OPTLAB, що включає множину модифікованих методів векторної оптимізації – методи першого та другого порядків, а також методи прямого пошуку і генетичні алгоритми [2].

III. СИНТЕЗ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ЕНЕРГОБЛОКУ

Оптимальні системи керування з ПІД та нечіткими регуляторами були синтезовані для ядерного реактора, парогенератора і парової турбіни, що дозволило порівняти нечіткі регулятори з традиційними ПІД регуляторами [1].

Математична модель енергоблоку АЕС як об'єкта керування побудована на основі розвитку моделей його основних елементів – ядерного реактора, парогенератора,

¹ Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Фрунзе, 21, Харків, 61002, УКРАЇНА, E-mail: severinv@mail.ru

парової турбіни, їх оптимальних систем керування та з'єднуючих елементів у вигляді (1):

$$\begin{aligned} dX_U/dt &= A_U X_U + B_U u + B_{UE} v_{Es}, \\ v &= C_U X_U, \quad \pi_k = C_{Uk} X_U. \end{aligned} \quad (9)$$

Вхідними діями є керуючий сигнал регулятора нейтронної потужності u та сигнал зміни електричної потужності енергоблоку v_{Es} . Вихідні змінні – нейтронна потужність реактора v та тиск пари в головному паровому колекторі (ГПК) π_k . Порядок цієї моделі $n = 40$.

Модель системи керування енергоблоком в режимі «Н», якій відповідає система автоматичної підтримки нейтронної потужності реактора, побудована за моделлю енергоблоку (9) з ПІ регулятором потужності (РП):

$$\begin{aligned} dX_Q/dt &= A_Q X_Q + B_Q v_s + B_{QE} v_{Es}, \\ v &= C_Q X_Q, \quad \pi_k = C_{Qk} X_Q, \end{aligned} \quad (10)$$

де вхідні дії – уставка потужності v_s та v_{Es} , вихідні змінні – нейтронна потужність реактора v та тиск пари π_k , $n = 41$. Аналогічно побудована нелінійна модель з нечітким ПІ регулятором потужності у вигляді (2).

Шляхом розв'язання задач синтезу (6) і (7) виконана оптимізація параметрів РП та отримано бажаний час регулювання $t_e = 100$ с. Для задачі мінімізації ПКО (7) виконаний перехід від моделі (10) до моделі вигляду (3). На Рис. 1 показані перехідні процеси зміни потужності ядерного реактора в оптимальних системах. Повільний процес, який відповідає мінімуму ПКО (PI), має перевагу для безпеки реактора. Ці результати дозволяють зробити висновок, що оптимальний лінійний ПІ регулятор нейтронної потужності більш ефективний, ніж оптимальний нечіткий ПІ регулятор.

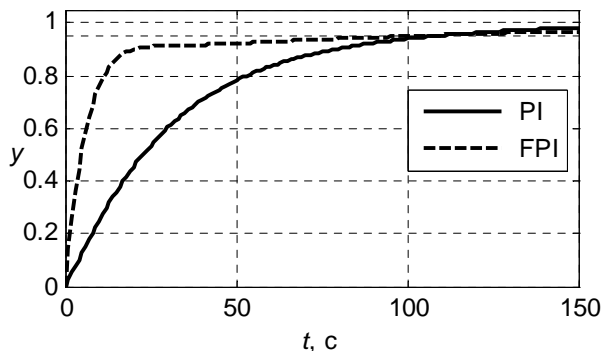


Рис. 1. Процеси зміни нейтронної потужності реактора

Модель системи керування режимом «Т», якій відповідає система автоматичної підтримки тиску пари перед турбіною, побудована за моделлю САК енергоблоку (10) з ПІ регулятором тиску:

$$dX_P/dt = A_P X_P + B_P v_{Es}, \quad \pi_k = C_P X_P,$$

має вхідну збуджуючу дію – сигнал зміни електричної потужності v_{Es} та вихідну змінну тиску пари в ГПК π_k , $n = 42$. Також побудовані моделі з лінійним ПІД та нечітким ПІ регуляторами тиску (РТ).

В Таб. 1 для трьох РТ наведені оптимальні значення прямих показників якості, що отримані шляхом розв'язання задачі (8). На Рис. 2 представлені перехідні процеси зміни тиску в головному паровому колекторі в оптимальних системах підтримки тиску. Ці результати дозволяють зробити висновок, що оптимальний традиційний лінійний ПІД регулятор тиску забезпечує найбільш швидкий перехідний процес з незначними коливаннями.

ТАБЛИЦЯ 1

Оптимальні значення показників якості

РТ	σ	ζ	λ	t_c, c
ПІ	1,000	0,206	1,652	10,984
ПІД	1,000	0,051	1,000	5,612
НПІ	0,950	0,200	18,389	7,911

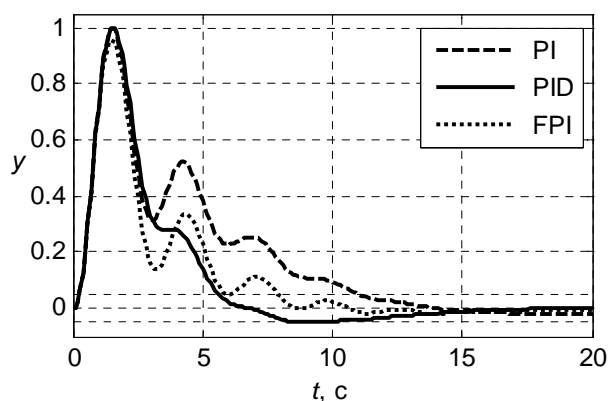


Рис. 2. Процеси зміни тиску пари перед турбіною

IV. ВИСНОВОК

Розглянуті задачі синтезу систем автоматичного керування на основі методів векторної оптимізації прямих показників якості процесів та покращеної інтегральної квадратичної оцінки. Побудовані математичні моделі систем керування енергоблоку АЕС з ядерним реактором ВВЕР-1000 для нормальних режимів експлуатації – автоматичної підтримки нейтронної потужності реактора (режим «Н») та тиску пари перед турбіною (режим «Т»). Виконано синтез регуляторів для нормальних режимів експлуатації що дозволяє дослідити вплив різних законів керування енергоблоком на якість перехідних процесів.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

- [1] Северин В. П., "Методы анализа и синтеза систем автоматического управления энергоблоков атомных электростанций", *Проблемы обеспечения безопасности информационных и управляющих систем АЭС*. Одесса: Астропринт. 2010. С. 137-152.
- [2] Severin V. P., "Application of Genetic Algorithms to Vector Optimization of the Automatic Control Systems", *Intelligent Information and Engineering Systems, "Information Technologies and Knowledge"*, N.13, vol. 3. Rzeszow, Poland, ITNEA, 2009, pp. 90-97.