

УДК 621.311.681.5

*В роботі запропоновано використання нелінійного структурного рішення для регулювання температури первинної пари прямооточного котлоагрегату з врахуванням обмежень на керований сигнал. Представлено дослідження нелінійної системи на стійкість при варіації додаткових параметрів настроювання*

*Ключові слова: регулювання температури пари, технологічні обмеження, стійкість системи*

*В работе предложено использование нелинейного структурного решения для регулирования температуры первичного пара прямооточного котлоагрегата с учетом ограничений на регулируемый параметр. Представлено исследование нелинейной системы на устойчивость при вариации дополнительных параметров настройки*

*Ключевые слова: регулирование температуры пара, технологические ограничения, устойчивость системы*

*In the article the new nonlinear scheme of control system of the overheated steam temperature for the straight-through boiler has been proposed. The research of the nonlinear system for stability with a variation of the additional settings has been presented*

*Key words: control system of the overheated steam temperature, output constraints, stability*

# ДОСЛІДЖЕННЯ СТІЙКОСТІ НЕЛІНІЙНОЇ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ПЕРВИННОЇ ПАРИ

**Б. В. Фоменко**

Асистент

Кафедра автоматизації теплоенергетичних процесів  
Національний технічний університет України «Київський  
політехнічний інститут»  
пр. Перемоги 37, м. Київ, 03056  
Контактний тел.: 067-508-79-65  
E-mail: bogdana.fomenko@gmail.com

## 1. Введення

Температура первинної пари парового котлоагрегату повинна підтримуватись в обмеженому діапазоні для забезпечення надійної та економічної роботи котла. При досягненні температури пари граничного значення спрацьовує автоматичний захист, що призводить до остановки котлоагрегату. Дослідження існуючих систем керування показало, що врахування технологічних обмежень відбувається лише на рівні сигналізації та блокувань. Таким чином, розробка та дослідження алгоритмів керування, які б враховували обмеження на керований сигнал, є актуальною задачею.

## 2. Постановка задачі

В роботах [1, 2, 3] обґрунтовані жорсткі технологічні обмеження щодо температури первинної пари та описані проблеми керування. Було запропоновано використання нелінійних структурних рішень з врахуванням обмежень на керований сигнал, які, у порівнянні із типовими, забезпечили утримання керованого

сигналу в жорсткому діапазоні під дією координатних збурень та покращили якість керування. В представлених рішеннях використовуються додаткові параметри настройки, вплив яких на якість регулювання та стійкість системи є недослідженим.

## 3. Опис запропонованого рішення

Розглянемо більш детально структурне рішення, що представлено на рис. 1. В якості основної регульованої змінної – температура після пароперегрівача, в якості обмеженої змінної – температура після парохолоджувача.

Якщо  $U \neq \hat{U}$ , тоді запишемо ПІ- та ПІД-алгоритми керування з компенсацією інтегрального насичення [3] для головного регулятора та регулятора обмеженої температури відповідно:

$$U_{\text{шт}}(p) = \frac{K_{p1}}{T_{11}p + Ka_1} E_1(p) + \frac{Ka_1}{T_{11}p + Ka_1} \hat{U}(p) + \frac{K_{p1} T_{11} p}{(T_{11}p + Ka_1)} Y_{1d}(p)$$

$$U_{1пд}(p) = \frac{K_{p1}(T_{11}p+1)}{T_{11}p+Ka_1} E_1(p) + \frac{Ka_1}{T_{11}p+Ka_1} \hat{U}(p) + \frac{K_{p1}T_{D1}T_{11}p^2}{(T_{11}p+1)(T_{11}p+Ka_1)} Y_{1d}(p)$$

$$U_{2пд}(p) = \frac{K_{p2}(T_{12}p+1)}{T_{12}p+Ka_2} Y_2(p) + \frac{Ka_2}{T_{12}p+Ka_2} \hat{U}(p),$$

$$U_{2пд}(p) = \frac{K_{p2}(T_{12}p+1)}{T_{12}p+Ka_2} Y_2(p) + \frac{Ka_2}{T_{12}p+Ka_2} \hat{U}(p) + \frac{K_{p2}T_{D2}T_{12}p^2}{(T_{12}p+1)(T_{12}p+Ka_2)} Y_2(p)$$

Де:  $Y_{1d}(p) = Y_1(p) + \frac{K_{D1}p}{T_{i1}p+1} Y_2(p)$ ,  $E_1(p) = R(p) - Y_{1d}(p)$

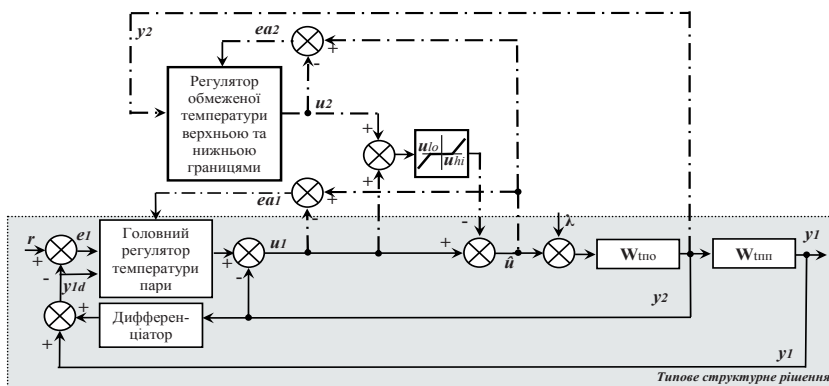


Рис. 1. Нелінійна система регулювання з обмеженням параметру  $y_2$

При наявності інтегральної складової в алгоритмі регулятора обмеженої температури параметри нелінійної ланки «зона нечутливості» визначаються за формулами:  $u_{2hi} = r_{2hi} \frac{K_{p2}}{Ka_2}$ ,  $u_{2lo} = r_{2lo} \frac{K_{p2}}{Ka_2}$ , де  $r_{2hi}$  та  $r_{2lo}$  - верхнє та нижнє допустиме значення керованої змінної  $y_2$ .

#### 4. Дослідження стійкості

Розглянемо задачу абсолютної стійкості в куті  $[\alpha, \beta]$  нелінійної системи з однією нелінійністю. Для застосування кругового критерію, необхідно привести систему до канонічної форми (рис. 2), яка складається з лінійної частини  $F$  та нелінійної.

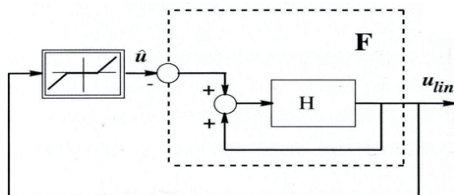


Рис. 2. Канонічна форма

Далі розглядається система порівняння, в якій нелінійна ланка замінюється лінійною ланкою з передаточною функцією  $W_c(p) = \mu$ ,  $\mu \in [\alpha, \beta]$ . Система порівняння повинна бути стійкою при будь-якому

$\mu \in [\alpha, \beta]$ ,  $0 < \alpha < \beta < \infty$ . Якщо передаточна функція  $F$  не має полюсів в правій напівплощині, то для того, щоб нелінійна система була абсолютно стійкою в куті  $[\alpha, \beta]$ , достатньо, щоб амплітудно-фазова характеристика (АФХ) лінійної частини не перетинала  $[\alpha, \beta]$  коло [4].

Нелінійна функція задовольняє наступним вимогам:  
 $f(0) = 0$ ,  $\alpha \leq \frac{f(u)}{u} \leq \beta$ ,  $0 \leq \alpha < \beta < \infty$  (рис. 3).

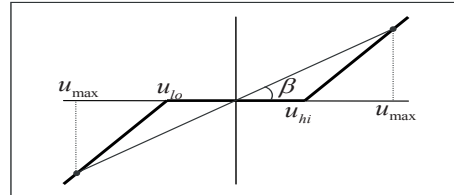


Рис. 3. Нелінійність «зона нечутливості»

Для нелінійної ланки, що приведена на рис. 3,  $\alpha = 0$ , тоді  $\frac{1}{\alpha} \rightarrow \infty$ .

Таким чином,  $[\alpha, \beta]$  коло перетворюється у вертикальну пряму, що проходить через точку  $-\frac{1}{\beta}$ . Для визначення  $\beta$  зробимо ряд допущень. Нехай  $\bar{u}$  кінцеве значення в сталому стані процесу.

Визначемо  $\Delta u_{hi} = u_{hi} - \bar{u}$  та  $\Delta u_{max} = u_{max} - \bar{u}$ ,

тоді  $\beta = \frac{\Delta u_{max} - \Delta u_{hi}}{\Delta u_{max}}$ ,

звідки  $-\frac{1}{\beta} = -\frac{\Delta u_{max}}{\Delta u_{max} - \Delta u_{hi}}$ ,

$$-\frac{1}{\beta} = -1 - \frac{\Delta u_{hi}}{\Delta u_{max} - \Delta u_{hi}} = -1 - \frac{1}{\frac{\Delta u_{max}}{\Delta u_{hi}} - 1} = -1 - \Delta_1.$$

#### 5. Результати

Результати досліджень нелінійної системи на стійкість при варіації додаткових параметрів настроювання представлені на рис. 4 а, б. Для того, щоб система була стійкою необхідно, щоб АФХ лінійної частини знаходилась зліва від горизонтальної лінії.

На рис. 5 приведені перехідні процеси для системи регулювання температури первинної пари під дією координатних збурень з використанням ПІД алгоритмів керування з компенсацією інтегрального насичення: 1 – типове рішення, 2 – нелінійне структурне рішення, що представлено на рис. 1 при  $Ka = K_p$ , 3 – нелінійне структурне рішення, що детально описане в [2].

Використання нелінійних алгоритмів дозволило забезпечити утримання керованого сигналу  $y_2$  в заданному діапазоні та покращити інтегральні показники якості. Результати в порівнянні із типовим рішенням (1) приведені в таблиці 1 у відсотках.

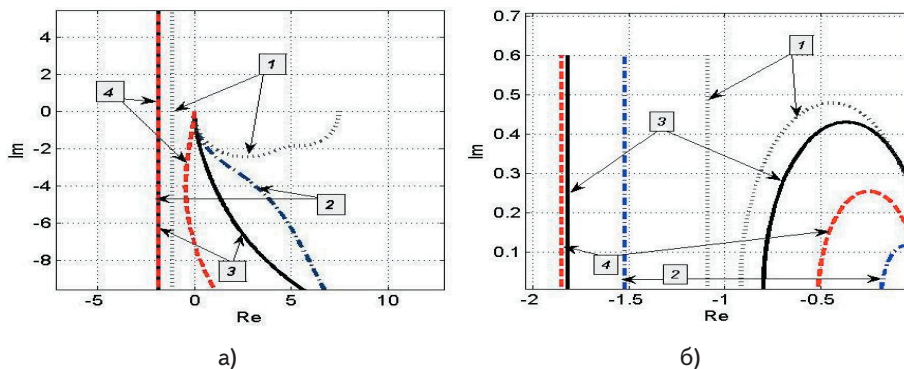


Рис. 4. Дослідження стійкості АСР температури первинної пари : а) з ПІ-регулятором

обмеження: 1 -  $K_a = \frac{K_p}{T_1}$ , 2 -  $K_a = \frac{1}{T_1}$ , 3 -  $K_a = K_p$ , 4 -  $K_a = \frac{1}{0.03T_1}$ , б) з ПІД-регулятором  
 обмеження: 1 -  $K_a = \frac{K_p}{\sqrt{T_D T_1}}$ , 2 -  $K_a = \frac{1}{\sqrt{T_D T_1}}$ , 3 -  $K_a = K_p$ , 4 -  $K_a = \frac{1}{0.03T_1}$

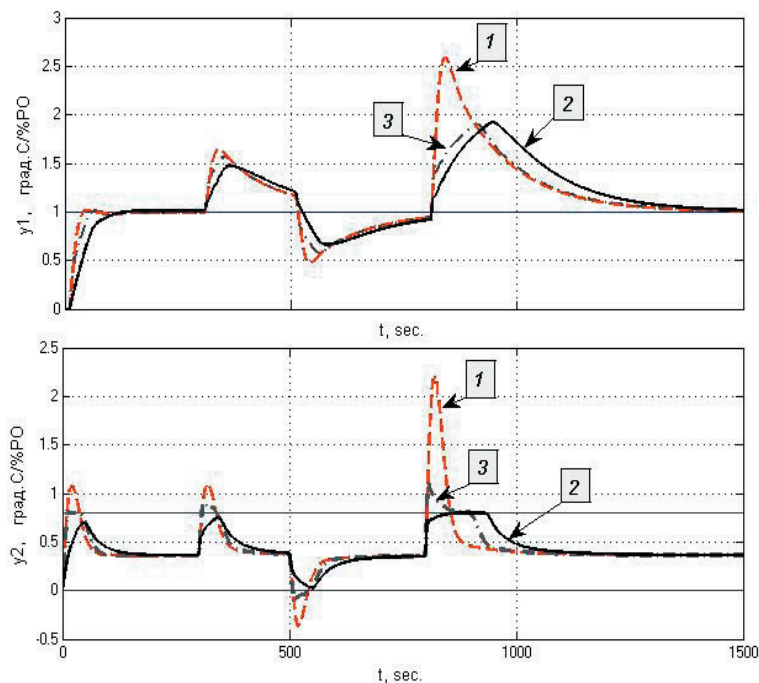


Рис. 5. Перехідні процеси

Таблиця 1

Зменшення інтегральних показників якості

структура	2 - «Nonlinear-Additive» ( $K_a=K_p$ )	3 - «Selectors»
$I_1 = \int_{t_n}^{t_k} e^2 dt$	-24,5%	-36,92%
$I_2 = \int_{t_n}^{t_k} te^2 dt$	-26,27%	-40,82%

**Висновки**

В роботі представлені дослідження впливу додаткових параметрів настроювання на стійкість нелінійної системи. Для більш точного забезпечення керованої змінної  $y_2$  в обмеженому діапазоні доцільно використовувати структурне рішення, що представлено на рис. 1. Для отримання кращих інтегральних показників якості слід використовувати структуру, що описана в [2] при умові, що є допустимим короткочасний вихід змінної  $y_2$  за заданий діапазон.

Показано, що з використанням запропонованих рішень суттєво зменшуються інтегральні показники якості системи. Застосування запропонованих рішень повинно зменшити кількість аварійних вимикань енергоблоку, та забезпечити розрахунковий термін служби поверхонь нагріву, що підвищить ефективність використання блоку і поліпшить його техніко-економічні показники.

**Література**

1. Bogdana V. Fomenko. Steam Temperature Automatic Control System with Nonlinear Components/ Bogdana V. Fomenko, Dmytriy R. Kornienko// Preprints of scientific Section of 13 International Student Olympiad on Automatic Control, Saint-Petersburg, 2010, P. 170-172.
2. Фоменко Б.В. Учет ограничений на выходную переменную в системе регулирования температуры перегрева пара/ Б.В. Фоменко, Д.Р. Корниенко// Восточно-Европейский журнал передовых технологий №3/4 (39), 2009, С. 21-24.
3. Ковриго Ю.М. Врахування обмежень для підвищення якості функціонування систем регулювання енергоблоків ТЕС і АЕС/ Ю.М. Ковриго, Б.В. Фоменко// Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы.
4. Glattfelder A.H. Control systems with input and output constraints / Glattfelder A.H., Shaufelberger W. – London.: Springer, 2003. – 499 p.