

МЕТОД НАЛАШТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ПІ- І ПІД-РЕГУЛЯТОРІВ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ДВОСТУПЕНЕВОЇ СЕПАРАЦІЇ НАФТИ

М. І. Горбійчук, Д. Д. Поварчук

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15; тел. (0342) 504521,
e-mail: gorb@nung.edu.ua, povarchukdima007@gmail.com

На основі отриманої авторами лінеаризованої математичної моделі процесу двоступеневої сепарації нафти здійснено налаштування параметрів ПІ- і ПІД-регуляторів системи автоматичного керування процесом двоступеневої сепарації нафти. Налаштування параметрів методом розміщення полюсів дає змогу однозначно визначити параметри налаштування ПІД-регулятора через параметри передавальних функцій за умови, що на p -площині вибрані відповідні точки з координатами, які характеризують ступінь стійкості та коливальність відповідного контуру керування.

Отримані результати налаштування параметрів ПІ- і ПІД-регуляторів системи автоматичного керування процесом двоступеневої сепарації нафти будуть використані для проведення імітаційного моделювання в програмі математичної лабораторії MATLAB.

Ключові слова: нафта, двоступенева сепарація, математична модель, лінеаризація, передавальні функції, стійкість, коливальність, регулятор.

На основе полученной авторами линеаризованной математической модели процесса двухступенчатой сепарации нефти произведена настройка параметров ПИ- и ПИД-регуляторов системы автоматического управления процессом двухступенчатой сепарации нефти. Настройка параметров методом размещения полюсов позволяет однозначно определить параметры настройки ПИД-регулятора по параметрам передаточных функций при условии, что на p -плоскости выбраны соответствующие точки с координатами, характеризующие степень устойчивости и колебательность соответствующего контура управления.

Полученные результаты настройки параметров ПИ- и ПИД-регуляторов системы автоматического управления процессом двухступенчатой сепарации нефти будут использованы для проведения имитационного моделирования в программе математической лаборатории MATLAB.

Ключевые слова: нефть, двухступенчатая сепарация, математическая модель, линеаризация, передаточные функции, устойчивость, колебательность, регулятор.

Based on the linearized mathematical model of two-stage oil separation, developed by the authors, the PI- and PID-regulators parameters adjustment of two-stage oil separation automatic control system were developed. The parameters adjustment using the method of pole assignment allows determining the settings of the PID controller through the parameters of the transfer functions, provided that on p -plane selected appropriate points with coordinates, characterizing the degree of stability and oscillation of the corresponding control circuit.

The obtained results of PI- and PID-regulators parameters adjustment of two-stage oil separation automatic control system will be used for simulation in the MATLAB mathematical laboratory program.

Key words: oil, two-stage separation, mathematical model, linearization, transfer functions, stability, oscillation, regulator.

Вступ

Синтез системи керування конкретним об'єктом є однією із важливих наукових прикладних задач. Метою синтезу є створення такої системи керування, яка б відповідала певним вимогам. По-перше, система керування повинна бути стійкою; по-друге, вона повинна мати певні показники якості, такі як перерегулювання, час регулювання, похибка регулювання [14].

Синтез систем керування можна здійснювати як в частотній, так і в часовій областях.

Методи синтезу в частотній області ґрунтуються на використанні частотних характеристик у вигляді діаграм Бode, Найквіста або з використанням частотних характеристик, побудованих у полярних координатах. Такі методи дають змогу синтезувати коригуючі пристрої системи таким чином, щоб задовольнити певні

критерії якості системи, такі як максимальне значення амплітуди частотної характеристики, резонансна частота, полоса пропускання і запас стійкості за амплітудою і фазою.

У часові області якість синтезованої системи керування оцінюють за її перехідною характеристикою, поведінка якої залежить від розміщення нулів і полюсів передавальної функції $W_r(p)$. Після того, як визначена структура автоматичної системи керування процесом сепарації, задачею синтезу є визначання параметрів налаштування певного типу регулятора.

Вибором параметрів налаштування ПІ- або ПІД-регуляторів можна досягти такого розміщення нулів і полюсів передавальної функції на p -площині, щоб досягти бажаної якості керування.

**Аналіз публікацій та висвітлення неві-
рішених раніше проблем**

Для сепараційних установок процес сепарації здійснюється у кілька стадій, найчастіше у дві стадії [7]. Режим роботи попередньої ступені суттєво впливає на ефективність роботи наступної ступені. Переважна більшість робіт, в яких висвітлюються питання математичного моделювання процесів сепарації, орієнтовані на вибір геометричних розмірів сепараторів [8,9], їхньої продуктивності [10] і ефективності роботи [10, 11].

Серед пізніших робіт слід відмітити роботу [12], де на основі моделі низькотемпературної сепарації запропонований підхід до побудови регулятора нелінійним об'єктом із затримкою. У роботі [13] запропоновано математичні моделі сепаратора, кожна із яких описує зміни тиску і рівня в сепараторі в залежності від технологічних параметрів. При цьому врахований взаємовплив рівня рідини і тиску в сепараторі.

Однією із перших математичних моделей, яка описує процес сепарації в термінах «вхід-вихід» і яка придатна для синтезу автоматичних систем керування, була модель, що запропонована у роботі [6]. На основі розробленої математичної моделі двоступеневої сепараційної установки [6], авторами проведено лінеаризацію даної математичної моделі в роботі [1]. Згідно з одержаними результатами з лінеаризації [1], встановлено що лінеаризована модель придатна для синтезу системи керування двоступеневою сепарацією з подальшим налаштуванням ПІ- і ПІД-регуляторів.

Отже, актуальною науковою задачею є налаштування параметрів ПІ- і ПІД-регуляторів системи автоматичного керування процесом двоступеневої сепарації нафти і в подальшому створення математичних моделей імітаційного призначення в програмному середовищі MATLAB.

Ціль та задачі дослідження

Метою роботи є обґрунтування доцільності проведення методу налаштування параметрів ПІ- і ПІД-регуляторів системи автоматичного керування процесом двоступеневої сепарації нафти і в подальшому створення математичних моделей імітаційного призначення в програмному середовищі MATLAB.

Для досягнення поставленої мети було сформульовано такі завдання:

1. Проаналізувати лінеаризовану математичну модель двоступеневої сепараційної установки [1].
2. Налаштувати параметри ПІ- і ПІД-регуляторів системи автоматичного керування процесом двоступеневої сепарації нафти.
3. Сформулювати висновки на основі проведених досліджень щодо створення імітаційної моделі в математичній лабораторії MATLAB.

Виклад основного матеріалу

Розглянемо систему автоматичного керування процесом сепарації першої ступені [1].

Оскільки $W_r(p) = W_1(p)W_c(p)W_p(p)$, то після врахування значень $W_c(p)$ і $W_p(p)$ отримаємо $W_r(p) = \text{diag} W_1(p)W_p(p)$. Виконавши операцію множення двох діагональних матриць, будемо мати

$$W_r(p) = \begin{bmatrix} w_{11}(p)w_{p1}(p) & 0 \\ 0 & w_{22}(p)w_{p2}(p) \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Передавальна функція замкненої системи керування відносно завдання \bar{y}_d [1] буде такою:

$$W_d(p) = (I + W_r(p))^{-1} W_r(p). \quad (2)$$

Враховуючи формулу (1), отримуємо

$$W_d(p) = \begin{bmatrix} \frac{w_{11}(p)w_{p1}(p)}{1+w_{11}(p)w_{p1}(p)} & 0 \\ 0 & \frac{w_{22}(p)w_{p2}(p)}{1+w_{22}(p)w_{p2}(p)} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Таким чином, наявність компенсатора перекресних зв'язків приводить до появи двох незалежних контурів керування з передавальними функціями

$$W_{d1}(p) = \frac{w_{11}(p)w_{p1}(p)}{1+w_{11}(p)w_{p1}(p)}, \quad (4)$$

$$W_{d2}(p) = \frac{w_{22}(p)w_{p2}(p)}{1+w_{22}(p)w_{p2}(p)}. \quad (5)$$

Допустимо, що в перший і другий контури керування включені ПІ-регулятори. Тоді

$$w_{p1}(p) = \frac{C_0^{(1)} + C_1^{(1)}p}{p}, \quad (6)$$

$$w_{p2}(p) = \frac{C_0^{(2)} + C_1^{(2)}p}{p}, \quad (7)$$

де $C_0^{(i)}, C_1^{(i)}, i=1,2$ - параметри налаштування регуляторів.

З врахуванням того, що $w_{11}(p) = \frac{b_{11}p + \alpha_{11}}{\Delta(p)}$

і $w_{22}(p) = \frac{b_{22}p + \alpha_{22}}{\Delta(p)}$, а також, беручи до уваги формули (6) і (7), отримуємо

$$W_{d1}(p) = \left\{ b_{11}C_1^{(1)}p^2 + (b_{11}C_0^{(1)} + \alpha_{11}C_1^{(1)})p + \alpha_{11}C_0^{(1)} \right\} \times \\ \times \left\{ p^3 + (b_{11}C_1^{(1)} + \beta_1)p^2 + \right. \\ \left. + (b_{11}C_0^{(1)} + \alpha_{11}C_1^{(1)} + \beta_2)p + \alpha_{11}C_0^{(1)} \right\}^{-1}; \quad (8)$$

$$W_{d2}(p) = \left\{ b_{22}C_1^{(2)}p^2 + (b_{22}C_0^{(2)} + \alpha_{22}C_1^{(2)})p + \alpha_{22}C_0^{(2)} \right\} \times \\ \times \left\{ p^3 + (b_{22}C_1^{(2)} + \beta_1)p^2 + \right. \\ \left. + (b_{22}C_0^{(2)} + \alpha_{22}C_1^{(2)} + \beta_2)p + \alpha_{22}C_0^{(2)} \right\}^{-1}; \quad (9)$$

де $\beta_1 = -(a_{11} + a_{22}), \beta_2 = a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}$.

Для вибору параметрів налаштування $C_0^{(i)}$, $C_1^{(i)}$, $i=1,2$ регуляторів скористаємося методом розміщення полюсів [3].

Відомо, що стійкість і якість системи керування визначається розміщенням полюсів на комплексній p -площині. Для того, щоб система керування була стійкою, необхідно, щоб всі полюси передавальної функції $W_{d1}(p)$ або $W_{d2}(p)$ були б розміщені у лівій напівплощині комплексної p -площини. Якість перехідного процесу в системі зумовлена двома величинами [2] – ступенем стійкості η і коливальністю μ .

Оскільки характеристичне рівняння передавальної функції (8) або (9) є поліномом третьої степені відносно змінної p , то він матиме три корені. Ступень стійкості визначає дійсний корінь, який є ближнім до уявної осі. Позначимо його як $p_3 = -\eta$. Інші два корені p_1 і p_2 можуть бути дійсними або комплексно-спряженими. Розглянемо більш загальний випадок, коли $p_1 = -\alpha + j\zeta$ і $p_2 = -\alpha - j\zeta$. Відношення уявної частини кореня до його дійсної частини має назву ступеня коливання системи, тобто $\mu = \frac{\zeta}{\alpha}$.

Параметри налаштування ПІ-регулятора $C_0^{(i)}$, $C_1^{(i)}$, $i=1,2$ виберемо так, щоб корені характеристичних поліномів передавальних функцій (8) і (9) знаходились в заданих точках на p -площині.

Розглянемо поліноми

$$\Delta_q^{(i)}(p) = p^3 + \delta_1^{(i)} p^2 + \delta_2^{(i)} p + \delta_3^{(i)}, \quad i=1,2. \quad (10)$$

Нехай $\Delta_i(p)$, $i=1,2$ – характеристичні поліноми передавальних функцій (8) і (9). Будемо вимагати, щоб виконувалась умова

$$\Delta_q^{(i)}(p) = \Delta_i(p), \quad i=1,2. \quad (11)$$

Коефіцієнти полінома (10) $\delta_j^{(i)}$, $i=1,2$, $j=1,3$ виберемо так, щоб його корені лежали в заданих точках на p -площині.

Враховуючи умову (1), будемо мати для $i=1$

$$p^3 + (b_{11}C_1^{(1)} + \beta_1)p^2 + (b_{11}C_0^{(1)} + \alpha_{11}C_1^{(1)} + \beta_2)p + \alpha_{11}C_0^{(1)} = p^3 + \delta_1^{(1)} p^2 + \delta_2^{(1)} p + \delta_3^{(1)}.$$

Прирівнюючи коефіцієнти при однакових степенях, доходимо висновку, що

$$b_{11}C_1^{(1)} + \beta_1 = \delta_1^{(1)}, \quad (12)$$

$$b_{11}C_0^{(1)} + \alpha_{11}C_1^{(1)} + \beta_2 = \delta_2^{(1)}, \quad (13)$$

$$\alpha_{11}C_0^{(1)} = \delta_3^{(1)}. \quad (14)$$

Отримана система із трьох рівнянь вміщує тільки два невідомих $C_0^{(1)}$ і $C_1^{(1)}$. Це означає, що тільки два корені рівняння $\Delta_q^{(1)}(p) = 0$ можна вибрати так, щоб вони знаходились у заданих

точках на p -площині. Нехай це будуть корені $p_1^{(1)}$ і $p_2^{(1)}$.

Із рівняння (14) визначимо, що

$$C_0^{(1)} = \frac{\delta_3^{(1)}}{\alpha_{11}}, \quad (15)$$

а із рівняння (12) знаходимо

$$C_1^{(1)} = \frac{\delta_1^{(1)} - \beta_1}{b_{11}}. \quad (16)$$

У відповідності з узагальненою теоремою Віста [4] між коренями полінома (10) існують такі співвідношення:

$$p_1^{(1)} + p_2^{(1)} + p_3^{(1)} = -\delta_1^{(1)}, \quad (17)$$

$$p_1^{(1)} p_2^{(1)} + p_1^{(1)} p_3^{(1)} + p_2^{(1)} p_3^{(1)} = \delta_2^{(1)}, \quad (18)$$

$$p_1^{(1)} p_2^{(1)} p_3^{(1)} = -\delta_3^{(1)}. \quad (19)$$

З огляду на отримані співвідношення значення $p_3^{(1)} = -\eta_1$ визначимо із рівняння (13).

Підставляючи значення $C_0^{(1)}$ і $C_1^{(1)}$, які визначаються виразами (15) і (16), отримаємо

$$b_{11} \frac{\delta_3^{(1)}}{\alpha_{11}} + \alpha_{11} \frac{\delta_1^{(1)} - \beta_1}{b_{11}} + \beta_2 = \delta_2^{(1)}. \quad (20)$$

Оскільки $p_1^{(1)} = -\alpha_1 + j\zeta_1$ і $p_2^{(1)} = -\alpha_1 - j\zeta_1$, а $p_3^{(1)} = -\eta_1$, то система рівнянь (17) – (19) набуде такого вигляду:

$$\delta_1^{(1)} = 2\alpha_1 + \eta_1, \quad (21)$$

$$\delta_2^{(1)} = \alpha_1^2 (1 + \mu_1^2) + 2\alpha_1 \eta_1, \quad (22)$$

$$\delta_3^{(1)} = \alpha_1^2 (1 + \mu_1^2) \eta_1. \quad (23)$$

Замінюючи $\delta_j^{(1)}$, $j=1,3$ у виразі (20) значенням, що визначаються формулами (21) – (23), приходимо до такого результату:

$$\left(\frac{b_{11} \alpha_1^2 (1 + \mu_1^2) + \alpha_{11} - 2\alpha_1}{\alpha_{11}} \right) \eta_1 = \alpha_1^2 (1 + \mu_1^2) - \frac{\alpha_{11}}{b_{11}} (2\alpha_1 - \beta_1) - \beta_2.$$

Із останнього рівняння визначимо ступень стійкості η_1 першого контуру системи автоматичного керування першою ступеню сепаративної установки

$$\eta_1 = \frac{\alpha_1^2 (1 + \mu_1^2) - \frac{\alpha_{11}}{b_{11}} (2\alpha_1 - \beta_1) - \beta_2}{\frac{b_{11}}{\alpha_{11}} \alpha_1^2 (1 + \mu_1^2) + \frac{\alpha_{11}}{b_{11}} - 2\alpha_1}. \quad (24)$$

Виходячи із умов стійкості системи, для величин α_1 , ζ_1 і η_1 повинні мати місце такі співвідношення: $\alpha_1 > 0$, $\zeta_1 \geq 0$ і $\eta_1 > 0$.

Після того, як певним чином вибрані значення величин α_1 і ζ_1 , за формулою (24) слід визначити ступінь стійкості η_1 . Потім необхідно обчислити значення $\delta_1^{(1)}$ і $\delta_3^{(1)}$, використавши

співвідношення (21) і (23), що дає змогу визначити параметри налаштування ПІ-регулятора за формулами (15) і (16).

Передавальні функції (8) і (9) мають однакові структури, тому результати, які отримані для першого контуру керування, можна поширити і на другий контур керування першою ступеню сепарації.

Параметри налаштування ПІ-регулятора:

$$C_0^{(2)} = \frac{\delta_3^{(2)}}{\alpha_{22}}, \quad (25)$$

$$C_1^{(2)} = \frac{\delta_1^{(2)} - \beta_1}{b_{22}}. \quad (26)$$

Значення величин $\delta_1^{(2)}$ і $\delta_3^{(2)}$ слід обчислювати за формулами

$$\delta_1^{(2)} = 2\alpha_2 + \eta_2, \quad (27)$$

$$\delta_3^{(2)} = \alpha_2^2(1 + \mu_2^2)\eta_2, \quad (28)$$

де

$$\eta_2 = \frac{\alpha_2^2(1 + \mu_2^2) - \frac{\alpha_{22}}{b_{22}}(2\alpha_2 - \beta_1) - \beta_2}{\frac{b_{22}}{\alpha_{22}}\alpha_2^2(1 + \mu_2^2) + \frac{\alpha_{22}}{b_{22}} - 2\alpha_2}. \quad (29)$$

Допустимо, що в першій і другий контри керування першою ступеню сепарації включені ПІД-регулятори с передавальними функціями

$$w_{pi}(p) = \frac{C_0^{(i)}}{p} + C_1^{(i)} + C_2^{(i)}p, \quad i=1,2. \quad (30)$$

Як і раніше, для вибору параметрів налаштування ПІД-регуляторів скористаємося методом розміщення полюсів на p -площині.

За формулами (4) і (5) знаходимо передавальні функції першого і другого контурів керування першим ступенем процесу сепарації

$$W_{d1}(p) = \{b_{11}C_2^{(1)}p^3 + (b_{11}C_1^{(1)} + \alpha_{11}C_2^{(1)})p^2 + (b_{11}C_0^{(1)} + \alpha_{11}C_1^{(1)})p + \alpha_{11}C_0^{(1)}\} \times \quad (31)$$

$$\times \left\{ (1 + b_{11}C_2^{(1)})p^3 + (b_{11}C_1^{(1)} + \alpha_{11}C_2^{(1)} + \beta_1)p^2 + (b_{11}C_0^{(1)} + \alpha_{11}C_1^{(1)} + \beta_2)p + \alpha_{11}C_0^{(1)} \right\}^{-1};$$

$$W_{d2}(p) = \{b_{22}C_2^{(2)}p^3 + (b_{22}C_1^{(2)} + \alpha_{22}C_2^{(2)})p^2 + (b_{22}C_0^{(2)} + \alpha_{22}C_1^{(2)})p + \alpha_{22}C_0^{(2)}\} \times \quad (32)$$

$$\times \left\{ (1 + b_{22}C_2^{(2)})p^3 + (b_{22}C_1^{(2)} + \alpha_{22}C_2^{(2)} + \beta_1)p^2 + (b_{22}C_0^{(2)} + \alpha_{22}C_1^{(2)} + \beta_2)p + \alpha_{22}C_0^{(2)} \right\}^{-1}.$$

Характеристичне рівняння першого контура керування з передавальною функцією (31) подамо у такому вигляді:

$$p^3 + \delta_1^{(1)}p^2 + \delta_2^{(1)}p + \delta_3^{(1)} = 0, \quad (33)$$

де

$$\delta_1^{(1)} = \frac{b_{11}C_1^{(1)} + \alpha_{11}C_2^{(1)} + \beta_1}{1 + b_{11}C_2^{(1)}}, \quad (34)$$

$$\delta_2^{(1)} = \frac{b_{11}C_0^{(1)} + \alpha_{11}C_1^{(1)} + \beta_2}{1 + b_{11}C_2^{(1)}}, \quad (35)$$

$$\delta_3^{(2)} = \frac{\alpha_{11}C_0^{(1)}}{1 + b_{11}C_2^{(1)}}. \quad (36)$$

Допускаємо, що корінь p_3 є дійсним, а два інші p_1 і p_2 комплексно-спряжені: $p_1 = -\eta_1$, $p_1^{(1)} = -\alpha_1 + j\zeta_1$ і $p_2^{(1)} = -\alpha_1 - j\zeta_1$, де $\alpha_1 > 0$, $\zeta_1 \geq 0$ і $\eta_1 > 0$.

Використовуючи узагальнену теорему Вієта, рівняння (34) – (36) запишемо у такому вигляді:

$$\frac{b_{11}C_1^{(1)} + \alpha_{11}C_2^{(1)} + \beta_1}{1 + b_{11}C_2^{(1)}} = -(p_1 + p_2 + p_3),$$

$$r_2 = \alpha_1^2(1 + \mu_1^2) + 2\alpha_1\eta_1;$$

$$\frac{b_{11}C_0^{(1)} + \alpha_{11}C_1^{(1)} + \beta_2}{1 + b_{11}C_2^{(1)}} = p_1p_2 + p_1p_3 + p_2p_3,$$

$$\frac{\alpha_{11}C_0^{(1)}}{1 + b_{11}C_2^{(1)}} = -p_1p_2p_3$$

Якщо врахувати значення коренів p_1 , p_2 і p_3 характеристичного рівняння (33), то отримуємо

$$\frac{b_{11}C_1^{(1)} + \alpha_{11}C_2^{(1)} + \beta_1}{1 + b_{11}C_2^{(1)}} = r_1^{(1)}, \quad (37)$$

$$\frac{b_{11}C_0^{(1)} + \alpha_{11}C_1^{(1)} + \beta_2}{1 + b_{11}C_2^{(1)}} = r_2^{(1)}, \quad (38)$$

$$\frac{\alpha_{11}C_0^{(1)}}{1 + b_{11}C_2^{(1)}} = r_3^{(1)}, \quad (39)$$

де

$$r_1^{(1)} = 2\alpha_1 + \eta_1, \quad (40)$$

$$r_2^{(1)} = \alpha_1^2(1 + \mu_1^2) + 2\alpha_1\eta_1, \quad (41)$$

$$r_3^{(1)} = \alpha_1^2(1 + \mu_1^2)\eta_1. \quad (42)$$

Після очевидних перетворень система рівнянь (37) – (39) набуде такого вигляду:

$$b_{11}C_1^{(1)} + (\alpha_{11} - b_{11}r_1^{(1)})C_2^{(1)} = r_1^{(1)} - \beta_1, \quad (43)$$

$$b_{11}C_0^{(1)} + \alpha_{11}C_1^{(1)} - b_{11}r_2^{(1)}C_2^{(1)} = r_2^{(1)} - \beta_2, \quad (44)$$

$$\alpha_{11}C_0^{(1)} - b_{11}r_3^{(1)}C_2^{(1)} = r_3^{(1)}. \quad (45)$$

Із рівняння (45) визначимо

$$C_0^{(1)} = \frac{r_3^{(1)} + b_{11}r_3^{(1)}C_2^{(1)}}{\alpha_{11}}. \quad (46)$$

Отримане значення $C_0^{(1)}$ підставимо у рівняння (44). У результаті отримуємо систему із двох лінійних алгебраїчних рівнянь

$$b_{11}C_1^{(1)} + (\alpha_{11} - b_{11}r_1^{(1)})C_2^{(1)} = r_1^{(1)} - \beta_1, \quad (47)$$

$$\alpha_{11}C_1^{(1)} + b_{11} \left(\frac{b_{11}}{\alpha_{11}} r_3^{(1)} - r_2^{(1)} \right) C_2^{(1)} = r_2^{(1)} - \frac{b_{11}}{\alpha_{11}} r_3^{(1)} - \beta_2. \quad (48)$$

Розв'язання отриманої системи рівнянь (47) і (48) дає такий результат:

$$C_1^{(1)} = \left\{ b_{11} (r_1^{(1)} - \beta_1) (b_{11}r_3^{(1)} - \alpha_{11}r_2^{(1)}) + (b_{11}r_1^{(1)} - \alpha_{11}) (\alpha_{11}r_2^{(1)} - b_{11}r_3^{(1)} - \alpha_{11}\beta_2) \right\} \times \quad (49)$$

$$\times \left\{ b_{11}^2 (b_{11}r_3^{(1)} - \alpha_{11}r_2^{(1)}) + \alpha_{11}^2 (b_{11}r_1^{(1)} - \alpha_{11}) \right\}^{-1};$$

$$C_2^{(1)} = \left\{ b_{11} (\alpha_{11}r_2^{(1)} - b_{11}r_3^{(1)} - \alpha_{11}\beta_2) + \alpha_{11}^2 (\beta_1 - r_1^{(1)}) \right\} \times$$

$$\times \left\{ b_{11}^2 (b_{11}r_3^{(1)} - \alpha_{11}r_2^{(1)}) + \alpha_{11}^2 (b_{11}r_1^{(1)} - \alpha_{11}) \right\}^{-1}. \quad (50)$$

Знаючи $C_2^{(1)}$, яке обчислюється за формулою (50), із співвідношення (46) визначимо, що

$$C_0^{(1)} = \frac{r_3^{(1)}}{\alpha_{11}} \left(1 + \frac{b_{11}^2 (r_2^{(1)}\alpha_{11} - b_{11}r_3^{(1)} - \beta_2) + \alpha_{11}^2 (\beta_1 - r_1^{(1)})}{b_{11}^2 (b_{11}r_3^{(1)} - \alpha_{11}r_2^{(1)}) + \alpha_{11}^2 (b_{11}r_1^{(1)} - \alpha_{11})} \right). \quad (51)$$

З огляду на те, що структури передавальних функцій (7) і (8) ідентичні, а в другий контур керування першої ступені сепараційної установки вміщує ПІД-регулятор, за аналогією (49) – (51) можемо виписати формули для обчислення параметрів налаштування такого регулятора

$$C_0^{(2)} = \frac{r_3^{(2)}}{\alpha_{22}} \left(1 + \frac{b_{22}^2 (r_2^{(2)}\alpha_{22} - b_{22}r_3^{(2)} - \beta_2) + \alpha_{22}^2 (\beta_1 - r_1^{(2)})}{b_{22}^2 (b_{22}r_3^{(2)} - \alpha_{22}r_2^{(2)}) + \alpha_{22}^2 (b_{22}r_1^{(2)} - \alpha_{22})} \right); \quad (52)$$

$$C_1^{(2)} = \left\{ b_{22} (r_1^{(2)} - \beta_1) (b_{22}r_3^{(2)} - \alpha_{22}r_2^{(2)}) + (b_{22}r_1^{(2)} - \alpha_{22}) (\alpha_{22}r_2^{(2)} - b_{22}r_3^{(2)} - \alpha_{22}\beta_2) \right\} \times \quad (53)$$

$$\times \left\{ b_{22}^2 (b_{22}r_3^{(2)} - \alpha_{22}r_2^{(2)}) + \alpha_{22}^2 (b_{22}r_1^{(2)} - \alpha_{22}) \right\}^{-1};$$

$$C_2^{(2)} = \left\{ b_{22} (\alpha_{22}r_2^{(2)} - b_{22}r_3^{(2)} - \alpha_{22}\beta_2) + \alpha_{22}^2 (\beta_1 - r_1^{(2)}) \right\} \times$$

$$\times \left\{ b_{22}^2 (b_{22}r_3^{(2)} - \alpha_{22}r_2^{(2)}) + \alpha_{22}^2 (b_{22}r_1^{(2)} - \alpha_{22}) \right\}^{-1}. \quad (54)$$

Розроблений метод визначення параметрів налаштування ПІ- та ПІД-регуляторів застосуємо і для другої ступені сепарації.

З огляду на те, що в контур керування включений компенсатор з матричною передавальною функцією $W_k^{(s)}(p)$, який компенсує

перехресні зв'язки, то маємо два незалежні контури керування.

Допускаємо, що в перший і другий контури керування включені ПІ-регулятори. Передавальні функції цих контурів будуть визначатись формулами, які аналогічні (4) і (5)

$$W_{d1}^{(s)}(p) = \frac{w_{11}^{(s)}(p)w_{p1}^{(s)}(p)}{1 + w_{11}^{(s)}(p)w_{p1}^{(s)}(p)}, \quad (55)$$

$$W_{d2}^{(s)}(p) = \frac{w_{22}^{(s)}(p)w_{p2}^{(s)}(p)}{1 + w_{22}^{(s)}(p)w_{p2}^{(s)}(p)}. \quad (56)$$

Передавальні функції $w_{11}^{(s)}(p)$ і $w_{22}^{(s)}(p)$ запишемо у такому вигляді:

$$w_{11}^{(s1)}(p) = \frac{b_{11}^{(s)}p + \alpha_{11}^{(s)}}{\Delta_s(p)}, \quad (57)$$

$$w_{22}^{(s1)}(p) = \frac{b_{22}^{(s)}p + \alpha_{22}^{(s)}}{\Delta_s(p)}. \quad (58)$$

Відповідно передавальні функції ПІ-регуляторів, які включені у перший і другий контури, будуть такими:

$$w_{p1}^{(s)}(p) = \frac{C_{s0}^{(1)} + C_{s1}^{(1)}p}{p}, \quad (59)$$

$$w_{p2}^{(s)}(p) = \frac{C_{s0}^{(2)} + C_{s1}^{(2)}p}{p}, \quad (60)$$

де $C_{s0}^{(i)}$, $C_{s1}^{(i)}$, $i=1,2$ - параметри налаштування регуляторів.

Якщо врахувати передавальні функції (57) і (58), а також передавальні функції ПІ-регуляторів (59) і (60), то передавальні функції (55) і (56) першого і другого контурів набудуть такого вигляду:

$$W_{d1}^{(s)}(p) = \left\{ b_{11}^{(s)}C_{s1}^{(1)}p^2 + (b_{11}^{(s)}C_{s0}^{(1)} + \alpha_{11}^{(s)}C_{s1}^{(1)})p + \alpha_{11}^{(s)}C_{s0}^{(1)} \right\} \times \left\{ p^3 + (b_{11}^{(s)}C_{s1}^{(1)} + \beta_1^{(s)})p^2 + (b_{11}^{(s)}C_{s0}^{(1)} + \alpha_{11}^{(s)}C_{s1}^{(1)} + \beta_2^{(s)})p + \alpha_{11}^{(s)}C_{s0}^{(1)} \right\}^{-1}; \quad (61)$$

$$W_{d2}^{(s)}(p) = \left\{ b_{22}^{(s)}C_{s1}^{(2)}p^2 + (b_{22}^{(s)}C_{s0}^{(2)} + \alpha_{22}^{(s)}C_{s1}^{(2)})p + \alpha_{22}^{(s)}C_{s0}^{(2)} \right\} \times \left\{ p^3 + (b_{22}^{(s)}C_{s1}^{(2)} + \beta_1^{(s)})p^2 + (b_{22}^{(s)}C_{s0}^{(2)} + \alpha_{22}^{(s)}C_{s1}^{(2)} + \beta_2^{(s)})p + \alpha_{22}^{(s)}C_{s0}^{(2)} \right\}^{-1}; \quad (62)$$

де $\beta_1^{(s)} = -(a_{11}^{(s)} + a_{22}^{(s)})$; $\beta_2^{(s)} = a_{11}^{(s)}a_{22}^{(s)} - a_{12}^{(s)}a_{21}^{(s)}$

Враховуючи те, що передавальні функції (31) і (32) першого і другого контурів керування першою ступеню сепарації за своєю структурою ідентичні передавальним функціям (61) і (62), можемо записати формули для обчислення параметрів налаштування параметрів ПІ-регуляторів

$$C_{s0}^{(i)} = \frac{\alpha_{si}^2 (1 + \mu_{si}^2) \eta_{si}}{\alpha_{ii}^{(s)}}, \quad (63)$$

$$C_{s1}^{(i)} = \frac{2\alpha_{si} + \eta_{si} - \beta_1^{(s)}}{b_{ii}^{(s)}}. \quad (64)$$

Ступені стійкості першого і другого контурів керування визначимо за формулами, які за своєю структурою ідентичні формулам (24) і (29)

$$\eta_{si} = \frac{\alpha_{si}^2 (1 + \mu_{si}^2) - \frac{\alpha_{ii}^{(s)}}{b_{ii}^{(s)}} (2\alpha_{si} - \beta_1^{(s)}) - \beta_2^{(s)}}{\frac{b_{ii}^{(s)}}{\alpha_{ii}^{(s)}} \alpha_{si}^2 (1 + \mu_{si}^2) + \frac{\alpha_{ii}^{(s)}}{b_{ii}^{(s)}} - 2\alpha_{si}}, \quad i = 1, 2, \quad (65)$$

де $\mu_{si} = \frac{\zeta_{si}}{\alpha_{si}}, i = 1, 2$.

Значення величин α_{si} і ζ_{si} вибирають із умови розміщення полюсів $p_{s1}^{(i)}$ і $p_{s2}^{(i)}$ передавальних функцій (61) і (62) у заданих точках на p -площині

$$p_{s1}^{(i)} = -\alpha_{si} + j\zeta_{si}, \quad (66)$$

$$p_{s2}^{(i)} = -\alpha_{si} - j\zeta_{si}, \quad i = 1, 2. \quad (67)$$

Як і раніше повинні мати місце такі співвідношення: $\alpha_{si} > 0, \zeta_{si} \geq 0$ і $\eta_{si} > 0, i = 1, 2$.

Тепер допустимо, що в першій і другий контури керування процесом сепарації другої ступені включені ПД-регулятори. Оскільки за допомогою передавальних функцій компенсаторів ліквідовані перехресні зв'язки, то передавальні функції першого і другого контурів керування будуть визначатись формулами (55) і (56). З врахуванням передавальних функцій ПД-регуляторів

$$w_{pi}^{(s)}(p) = \frac{C_{s0}^{(i)} + C_{s1}^{(i)}p + C_{s2}^{(i)}p^2}{p}, \quad i = 1, 2 \quad (68)$$

співвідношення (55) і (56) набудуть такого вигляду:

$$W_{di}^{(sp)}(p) = \left\{ b_{ii}^{(s)} C_{s2}^{(i)} p^3 + \left(b_{ii}^{(s)} C_{s1}^{(i)} + \alpha_{ii}^{(s)} C_{s2}^{(i)} \right) p^2 + \left(b_{ii}^{(s)} C_{s0}^{(i)} + \alpha_{ii}^{(s)} C_{s1}^{(i)} \right) p + \alpha_{ii}^{(s)} C_{s0}^{(i)} \right\} \times \left\{ \left(1 + b_{ii}^{(s)} C_{s2}^{(i)} \right) p^3 + \left(b_{ii}^{(s)} C_{s1}^{(i)} + \alpha_{ii}^{(s)} C_{s2}^{(i)} + \beta_1^{(s)} \right) p^2 + \left(b_{ii}^{(s)} C_{s0}^{(i)} + \alpha_{ii}^{(s)} C_{s1}^{(i)} + \beta_2^{(s)} \right) p + \alpha_{ii}^{(s)} C_{s0}^{(i)} \right\}^{-1}, \quad i = 1, 2; \quad (69)$$

$$C_0^{(i)} = \frac{r_3^{(i)}}{\alpha_{ii}^{(s)}} \left(1 + \right. \quad (70)$$

$$\left. \frac{b_{ii}^{(s)2} \left(r_{s2}^{(i)} \alpha_{ii}^{(s)} - b_{ii}^{(s)} r_{s3}^{(i)} - \beta_2^{(s)} \right) + \alpha_{ii}^{(s)2} \left(\beta_1^{(s)} - r_{s1}^{(i)} \right)}{b_{ii}^{(s)2} \left(b_{ii}^{(s)} r_{s3}^{(i)} - \alpha_{ii}^{(s)} r_{s2}^{(i)} \right) + \alpha_{ii}^{(s)2} \left(b_{ii}^{(s)} r_{s1}^{(i)} - \alpha_{ii}^{(s)} \right)} \right);$$

$$C_1^{(i)} = \left\{ b_{ii}^{(s)} \left(r_{s1}^{(i)} - \beta_1^{(s)} \right) \left(b_{ii}^{(s)} r_{s3}^{(i)} - \alpha_{ii}^{(s)} r_{s2}^{(i)} \right) + \right. \quad (71)$$

$$\left. + \left(b_{ii}^{(s)} r_{s1}^{(i)} - \alpha_{ii}^{(s)} \right) \left(\alpha_{ii}^{(s)} r_{s2}^{(i)} - b_{ii}^{(s)} r_{s3}^{(i)} - \alpha_{ii}^{(s)} \beta_2^{(s)} \right) \right\} \times$$

$$\times \left\{ b_{ii}^{(s)2} \left(b_{ii}^{(s)} r_{s3}^{(i)} - \alpha_{ii}^{(s)} r_{s2}^{(i)} \right) + \alpha_{ii}^{(s)2} \left(b_{ii}^{(s)} r_{s1}^{(i)} - \alpha_{ii}^{(s)} \right) \right\}^{-1};$$

$$C_1^{(i)} = \left\{ b_{ii}^{(s)} \left(\alpha_{ii}^{(s)} r_{s2}^{(i)} - b_{ii}^{(s)} r_{s3}^{(i)} - \alpha_{ii}^{(s)} \beta_2^{(s)} \right) + \alpha_{ii}^{(s)2} \left(\beta_1^{(s)} - r_{s1}^{(i)} \right) \right\} \times$$

$$\times \left\{ b_{ii}^{(s)2} \left(b_{ii}^{(s)} r_{s3}^{(i)} - \alpha_{ii}^{(s)} r_{s2}^{(i)} \right) + \alpha_{ii}^{(s)2} \left(b_{ii}^{(s)} r_{s1}^{(i)} - \alpha_{ii}^{(s)} \right) \right\}^{-1},$$

$$i = 1, 2, \quad (72)$$

де

$$r_{s1}^{(i)} = 2\alpha_{si} + \eta_{si}, \quad (73)$$

$$r_{s2}^{(i)} = \alpha_{si}^2 (1 + \mu_{si}^2) + 2\alpha_{si} \eta_{si}, \quad (74)$$

$$r_{s3}^{(i)} = \alpha_{si}^2 (1 + \mu_{si}^2) \eta_{si}, \quad i = 1, 2. \quad (75)$$

Оскільки структури рівнянь (69) повторюють структури (31) і (32), то можемо зробити висновок, що відповідні формули (70) – (75) для визначення параметрів налаштування ПД-регуляторів, збігаються з (52) – (54) з точністю до коефіцієнтів.

Висновки

Таким чином, використання методу розміщення полюсів дає змогу однозначно визначити параметри налаштування ПД-регулятора через параметри передавальних функцій за умови, що на p -площині вибрані відповідні точки з координатами, що характеризують ступінь стійкості та коливальність відповідного контуру керування.

При застосуванні П-регулятора існує можливість вибрати тільки ступені коливальності, а ступінь стійкості контура керування визначатиметься як параметрами передавальної функції, так і параметрами налаштування регулятора. Отримані результати налаштування параметрів П- і ПД-регуляторів системи автоматичного керування процесом двоступеневої сепарації нафти будуть використані для проведення імітаційного моделювання в програмі математичної лабораторії MATLAB.

Література

- 1 Горбійчук М.І. Лабораторні дослідження з винесення рідини із газових і газоконденсатних свердловин за допомогою твердих поверхнево-активних речовин / М. І. Горбійчук, Д. Д. Поварчук // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2017. – № 3(64). – С. 76-83.
- 2 Справочник по теории автоматического управления / Александров А. Г, Артемьев В. М, Белоглазов И. Н. [и др.]; под ред. А. А. Красовского. – М.: Наука, 1987. – 712 с.
- 3 Дорф Р. Современные системы управления / Р. Дорф, Р. Бишоп; пер. с англ. Б. И. Копылова. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2002. – 832 с.
- 4 Демидович Б. П. Основы вычислительной математики / Б. П. Демидович, И. А. Макрон. – 3 изд., исп. – М.: Наука, 1966. – 664 с.
- 5 Лазута И. В. Технологические процессы, оборудование и автоматизация нефтегазодобычи: уч. пособие / И. В. Лазута, Р. Ю. Сухарев. – Омск: СИБАДИ, 2015. – 160 с.

6 Horbiychuk M.I. Development of the mathematical model for the installation of two-stage separating / Horbiychuk M., Povarchuk D., Gumenyuk T., Lazoriv N. – Mode access: <https://sis-journal.com/arhiv/9/>

7 Devold H. Oil and gas production handbook. An introduction to oil and gas production / H. Devold - ABB ATPA Oil and Gas, 2006. – 84 p.

8 Каспарьянц К. С. Процессы и аппараты для объектов промышленной подготовки нефти и газа: монография / К. С. Каспарьянц, В. И. Кузин, Л. Г. Григорян. – М.: Недра, 1977. – 254 с.

9 Ланчаков Г. А. Технологические процессы подготовки природного газа и методы расчета оборудования: монография / Г. А. Ланчаков, А. Н. Кульков, Г. К. Зиберт. – М.: Недра, 2000. – 279 с.

10 Лутошкин Г. С. Сбор и подготовка нефти, газа и воды: учебник для вузов / Г. С. Лутошкин. – М.: Альянс, 2005. – 320 с.

11 Ляпощенко О. О. Гідродинаміка інерційно-фільтруючих сепараційних пристроїв очищення природного газу: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08 / Ляпощенко Олександр Олександрович. – Суми, 2006. – 135 с.

12 Кулінченко Г. В. Формування підходу до побудови регулятора процесу низькотемпературної сепарації природного газу / Г. В. Кулінченко, А. В. Павлов, П. В. Леонтьєв // Вісник Вінницького політехнічного інституту. Автоматика та інформаційно-вимірювальна техніка. – 2015. – №6. – С. 9 – 17.

13 Тугов В. В. Разработка математического обеспечения оптимального проектирования и автоматического управления технологического процесса дегазации нефти: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06 / Тугов Виталий Валерьевич. – Оренбург, 2002. – 208 с.

14 Справочник по теории автоматического управления / [Александров А. Г., Артемьев В. М., Белоглазов И. Н. и др.]; под ред. А. А. Красовского. – М.: Наука, 1987. – 712 с.

*Стаття надійшла до редакційної колегії
30.10.17*

*Рекомендована до друку
професором **Олійником А.П.**
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)
д-ром техн. наук **Мещеряковим Л.І.**
(ДВНЗ «Національний гірничий університет»,
м. Дніпро)*