

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-291-5-45-52>

УДК 622.7: 534

МОДЕЛЮВАННЯ БАГАТОКОНТУРНОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ БУРІННЯ СВЕРДЛОВИН НА ОСНОВІ ПІД КОНТРОЛЕРІВ

Моркун В.С., Моркун Н.В., Бобров Є.Ю., Грищенко Я.О.

MODELING OF A MULTI-CIRCUIT SYSTEM FOR AUTOMATED CONTROL OF THE WELL DRILLING PROCESS BASED ON SUBCONTROLLERS

Morkun V.S., Morkun N.V., Bobrov E.Y., Hryshchenko Y.O.

Децентралізовані системи автоматизованого керування (САК) на основі пропорційно-інтегрально-диференціальних (ПІД) контролерів залишаються найпоширенішим рішенням для керування промисловими процесами з кількома входами та виходами (МІМО). Це пов'язано з їхньою гнучкістю, простотою та властивою стійкістю до відмов порівняно з централізованими структурами керування. Навіть коли застосовуються більш досконалі стратегії, наприклад, модельно-прогнозуючого керування (МРС), ПІД контролери зазвичай використовуються на нижчих рівнях керування відповідних систем. Розглянуто автоматизовану систему керування процесом буріння свердловин, реалізовану на основі електроприводу. У досліджуваній ієрархічній САК на її нижньому рівні використана структура, що включає три контури на основі пропорційно-інтегрально-диференціальних (ПІД) контролерів, які забезпечують регулювання швидкості обертання долота RPM, навантаження на долото WOB та параметрів системи очистки свердловини (перш за все, її продуктивності). Моделювання процесу буріння засвідчує тісний зв'язок між зазначеними параметрами, що потребує відповідного налаштування кожного контуру керування. Оптиміальне налаштування децентралізованих ПІД-контролерів у багатоконтурних САК залишається складним і комплексним завданням. Більшість відомих методів налаштування багатоконтурних ПІД-контролерів схожі тим, що вони використовують правила налаштування одного контуру для отримання початкових значень для окремих контролерів, а потім розлаштовують окремі контури для збереження стабільності всієї системи. В умовах реального виробничого процесу такий підхід на завжди дозволяє досягнути бажаних

показників продуктивності та надійності керування. Досліджено алгоритм налаштування багатоконтурних САК на основі ПІД контролерів, що реалізує узагальнений метод із внутрішньою моделлю (ІМС). Застосовується критерій, що базується на визначенні параметрів частотної характеристики замкнутого контуру для досягнення бажаних показників продуктивності та надійності керування. Частотна характеристика замкнутого контуру САК отримується в результаті розрахунку вихідного сигналу системи у відповідь на синусоїдальний вхід. Отримані результати свідчать про те, що налаштування триконтурної САК на основі ПІД контролерів із застосуванням дослідженого методу дозволяє досягнути максимально точної відповідності бажаним показникам продуктивності та надійності керування. Досліджений метод може бути застосований до динамічних моделей будь-якого порядку. При цьому характеристики зворотної реакції замкнутого контуру керування задаються заздалегідь. Крім того, в результаті виконання відповідного алгоритму надається інформація про запаси стійкості та характеристики чутливості САК.

Ключові слова: буріння, моделювання, автоматизоване керування, багатоконтурна система, контролер.

Вступ. Структуру системи автоматизованого керування (САК) процесом буріння свердловин доцільно будувати у вигляді ієрархічної структури з використанням на нижньому рівні локальних підсистем для регулювання окремих змінних процесу. Такі

децентралізовані САК на основі пропорційно-інтегрально-диференціальних (ПІД) контролерів залишаються найпоширенішим рішенням для керування промисловими процесами з кількома входами та виходами (МІМО). Це пов'язано з їхньою гнучкістю, простотою та властивою стійкістю до відмов порівняно з централізованими структурами керування. Навіть коли застосовуються більш досконалі стратегії, наприклад, модельно-прогнозуючого керування (МРС), ПІД контролери зазвичай використовуються на нижчих рівнях керування відповідних систем [1].

Доступна величезна кількість методів налаштування окремого ПІД контролера в одноконтурній САК, включаючи аналітичні правила на основі моделей, методи граничної частоти та налаштування на основі оптимізації. Коли взаємодії між змінними в процесах МІМО є значними, налаштування кожного децентралізованого контролера незалежно за допомогою будь-якого з цих методів може призвести до низької продуктивності або, що ще гірше, до нестабільності замкнутого циклу багатовимірної системи, навіть коли кожен окремих цикл стабільний [2].

У теперішній час для налаштування децентралізованих ПІД контролерів у багатоконтурній САК з урахуванням взаємодії керованих змінних застосовуються методи, які зазвичай класифікуються [2] на модельні підходи, такі як розлаштування [3], послідовне замикання циклу [4] та незалежне проектування [5] або безмодельне послідовне [6] та децентралізоване автоналаштування [7].

Разом з тим, слід відмітити, що незважаючи на наведені рішення, оптимальне налаштування децентралізованих ПІД-контролерів у багатоконтурних САК залишається складним і комплексним завданням. Промислова практика часто полягає в послідовному замиканні циклу з подальшим евристичним та консервативним розлаштуванням, що є складним і трудомістким процесом [2,8].

Метою роботи є моделювання нижнього рівня ієрархічної системи автоматизованого керування процесом буріння свердловин на базі багатоконтурного ПІД регулювання.

Виклад основного матеріалу. Керування процесом буріння свердловин може бути виконано за різним технічними і технологічними принципами і мати відповідні конструктивні особливості. У даному дослідженні розглядається автоматизована

система буріння, реалізована на основі електроприводу. У порівнянні з гідравлічною установкою, ця система не тільки покращує точність керування, але й значно підвищує надійність системи, тим самим зменшуючи час на технічне обслуговування та вартість установки [9].

У досліджуваній САК на її нижньому рівні використана структура, що включає три контури, які забезпечують регулювання швидкості обертання долота RPM, навантаження на долото WOB та параметрів системи очистки свердловини (перш за все, її продуктивності).

Моделювання процесу буріння засвідчує тісний зв'язок між зазначеними параметрами. Це підтверджують наведені нижче рівняння (1), (2), що відповідають моделі Галле та Вудса [10], моделі Уоррена [11] та багато інших досліджень [12]

$$ROP = \frac{WOB_{sf}^k \left[e^{\left(-100/RPM_{sf}^2 \right) \cdot RPM_{sf} b_1 + b_2 RPM_{sf} \left(1 - e^{\left(-100/RPM_{sf}^2 \right)} \right)} \right]}{C_f \frac{(0.928125 \cdot OD_{bit}^2 + 6 \cdot OD_{bit} + 1)^p}{p}}, \quad (1)$$

$$ROP = K \frac{RPM_{sf} (WOB_{sf} - (WOB_{sf})_t)^2}{OD_{bit}^2 \cdot s^2}, \quad (2)$$

де b_1 дорівнює 0,75 або 0,428 для м'яких і твердих утворень відповідно; b_2 дорівнює 0,5 або 0,2 для м'яких і твердих утворень відповідно; p - коефіцієнт зносу зуба; k - коефіцієнт, що враховує вплив навантаження на долото на ROP; C_f - коефіцієнт, що враховує тип долота, гідравліку, буровий розчин і міцність пласта; K - константа, що залежить від властивостей бурового долота та абразивності пласта, як наслідок умов буріння; OD_{bit} - діаметр долота.

У загальному випадку, маючи на увазі багатоконтурну структуру системи автоматичного керування (САК), стабільний багатозмінний процес G з n входами та n виходами у відкритому контурі та n -багатоконтурними діагональними контролерами G_c може бути представлений у вигляді [13]

$$G_c(s) = \text{diag}[G_{c1}, G_{c2}, \dots, G_{cn}]. \quad (3)$$

Зазначена багатоконтурна система зворотного зв'язку представлена блок-схемою на рис. 1.

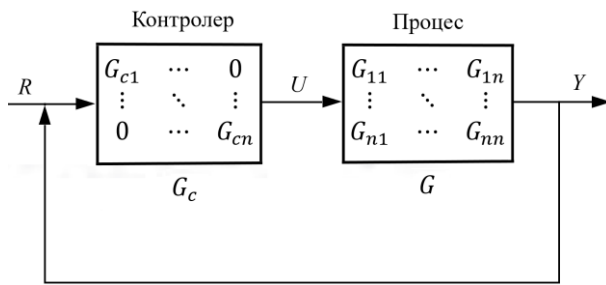


Рис. 1. Блок-схема багатоконтурної системи керування

Контролер i -го циклу виглядає наступним чином

$$U_i = G_{ci}(Y_i - R_i). \quad (4)$$

У рівнянні (4) входи, виходи та задані значення керованих змінних представлені як $U = (U_1, U_2, \dots, U_n)$, $Y = (Y_1, Y_2, \dots, Y_n)$ та $R = (R_1, R_2, \dots, R_n)$ відповідно.

Щоб імітувати структуру керування з трьома контурами для регулювання основних змінних процесу буріння, досліджена модель Simulink® /MATLAB®, яка показана на рис. 2 [14].

У наведений на рис. 2 схемі використано наступні блоки: 1,5,6,18,19,20 - блок Subsystem із бібліотек Simulink / Commonly Used Blocks, Simulink / Ports & Subsystems; 2,3,4 - блок PID Controller із бібліотеки Simulink / Continuous; 7,12,13,14,21 - блок Mux із бібліотеки Simulink /

Signal Routing; 8 - блок Demux із бібліотеки Simulink / Signal Routing; 9,10,11 - блок Sum із бібліотеки Simulink / Math Operations; 15, 16,17 - блок Scope із бібліотеки Simulink / Commonly Used Blocks, Simulink / Sinks; 22 - блок To Workspace із бібліотеки Simulink / Sinks.

Ця модель має в якості вхідних даних три змінні, що регулюються ПІД контролерами (блоки 2,3,4) і дві основні змінні збурювання: фізико-механічні властивості породи, що буриться, та стан бурового долота. У блоці 1 представлена модель процесу буріння, блоки 5,6,18,19,20 генерують збурювання та завади у сформованому сигналі.

На рис. 3 наведено схему моделі одного з контурів ПІД керування у програмі Simulink® /MATLAB® [15,16]. Модель симулює регулювання швидкості обертання двигуна постійного струму при наявності збурювання, що впливає на крутний момент, за наявності завад у вимірюваному сигналі.

У наведений на рис. 3 схемі використано наступні блоки: 1 - блок Discrete PID Controller із бібліотеки Simulink / Discrete; 2,3,4 - блок Subsystem із бібліотек Simulink / Commonly Used Blocks, Simulink / Ports & Subsystems; 5 - блок Zero-Order Hold із бібліотеки Simulink / Discrete; 6 - блок Sum із бібліотеки Simulink / Math Operations; 7 - блок Mux із бібліотеки Simulink / Signal Routing; 8 - блок Scope із бібліотеки Simulink / Commonly Used Blocks, Simulink / Sinks.

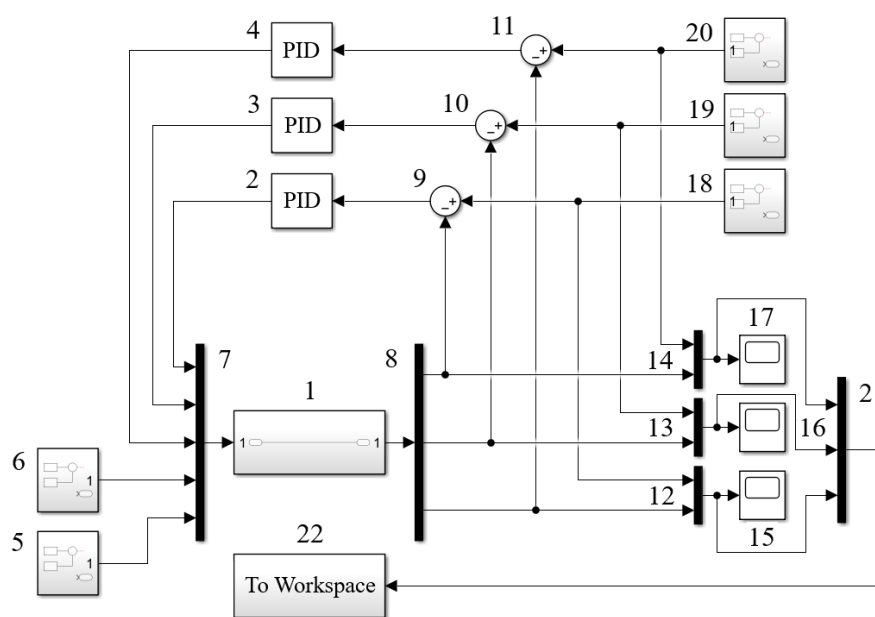


Рис. 2. Модель Simulink децентралізованого ПІД керування процесом буріння свердловин

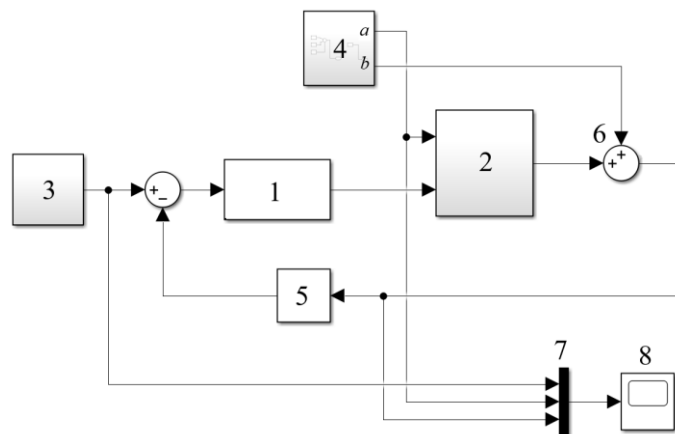


Рис. 3. Схема моделі замкненої системи ПД керування

Блок 1 (Subsystem) реалізує дискретний ПД-контролер. Вихід блоку є зваженою сумою вхідного сигналу, інтеграла вхідного сигналу та похідної вхідного сигналу

$$W(z) = P + I \cdot T_s \frac{1}{z-1} + D \frac{N}{1+N \cdot T_s \frac{1}{z-1}}, \quad (5)$$

де P, I, D, N – коефіцієнти пропорційної, інтегральної, диференціальної складових та фільтрації відповідно.

Ваговими коефіцієнтами є пропорційні, інтегральні та похідні параметри посилення. Поліус першого порядку фільтрує похідну дію.

Блок 2 (Subsystem) містить модель двигуна постійного струму (рис. 4), блок 3 (Subsystem) генерую сигнал уставки (задана швидкість) у САК, а блок 4 – збурень (вихід a – вплив через прикладений крутний момент, вихід b – завади у вимірюваному сигналі).

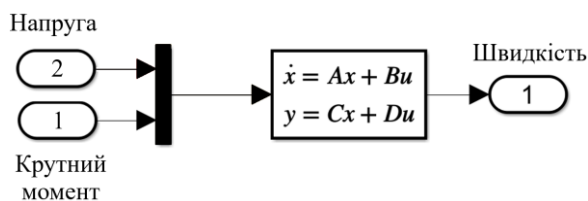


Рис. 4. Модель двигуна постійного струму у блоці Subsystem

Блок Zero-Order Hold зберігає свої вхідні дані протягом указанного періоду вибірки. У наведеному прикладі цей блок виконує функції перетворення аналогового сигналу у дискретну форму.

Для налаштування ПД контролера використано інструментарій Identification Toolbox MATLAB. У наведеному прикладі після

налаштування отримано такі значення: $P = 15.35$, $I = 39.74$, $D = -0.713$, $N = 4.54$.

На рис. 5 наведено графіки перехідних процесів у замкнутій системі регулювання.

Як видно з результатів моделювання ПД - контролер непогано справляється із задачею стабілізації регульованої величини при наявності збурень і завад у вимірюваному сигналі. Це дозволяє розглядати замкнену САК на основі ПД контролера у якості структурного елемента на базовому рівні керування буровою установкою.

Разом з тим, слід відмітити, що результати моделювання чітко показують сильний зв'язок у цій системі між змінними, що регулюються. Це свідчить про те, що для цього прикладу параметри ПД - контролерів не слід визначати незалежно. Для наведеної структури керування з трьома децентралізованими ПД - контролерами слід застосовувати процедуру багатоконтурного налаштування із застосуванням відповідних методів [17].

Більшість методів налаштування ПД-регуляторів у багатоконтурних САК [2,3], доступних на даний момент, схожі тим, що вони використовують правила налаштування одного контуру для отримання початкових значень щодо окремих контролерів, а потім розлаштовують окремі контури для збереження стабільності всієї системи. В умовах реального виробничого процесу такий підхід на завжди дозволяє досягнути бажаних показників продуктивності та надійності керування.

Для вирішення поставленої задачі використаний метод налаштування ПД контролерів у багатоконтурних САК, який узагальнює методику налаштування із використанням внутрішньої моделі (ІМС) [18] на багатоконтурні структури [19].

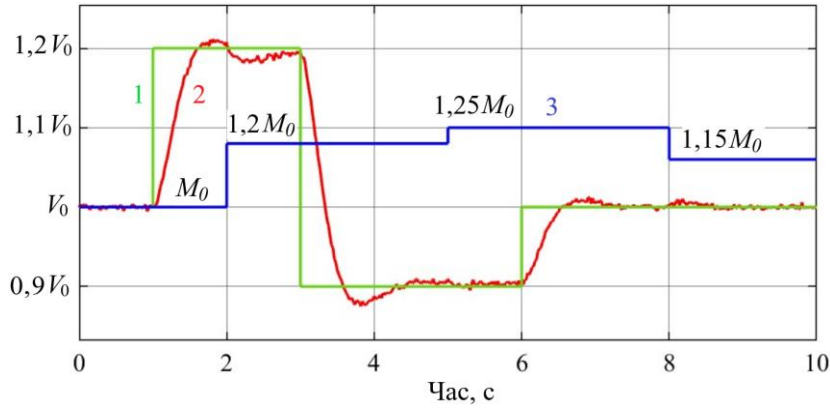


Рис. 5. Графіки перехідних процесів у замкненій системі регулювання (V_0 – швидкість обертання долота RPM; M_0 – прикладений крутний момент)

Розширити структуру ІМС для системи SISO до багатоконтурної структури можливо застосуванням матриці передавальної функції, яка включає лише діагональні елементи $G(s)$ [18,20]

$$\tilde{G}(s) = \text{diag}[G_{11}, G_{22}, \dots, G_{nn}]. \quad (6)$$

Багатоконтурні контролери в класичній структурі зворотного зв'язку тоді будуть визначені як

$$G_c(s) = [1 - Q(s)\tilde{G}(s)]^{-1}Q(s). \quad (7)$$

де Q – діагональна матриця, що представляє контролер ІМС.

Для налаштування багатоканальних контролерів, застосовується критерій, що базується на частотній характеристиці замкнутого контуру, яка отримується в результаті розрахунку вихідного сигналу системи у відповідь на синусоїдальний вхід [19].

У системах МІМО передавальна функція замкнутого контуру може бути представлена як

$$H(s) = G(s)G_c(s)[I + G(s)G_c(s)]^{-1}. \quad (8)$$

Передавальна функція замкнутого контуру може бути виражена наступною матричною формою

$$H(s) = \begin{bmatrix} H_{11} & \dots & H_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{n1} & \dots & H_{nn} \end{bmatrix} \quad (9)$$

або

$$H = \{H_{ij}\}, \quad i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, n, \quad (10)$$

де H_{ij} – реакція замкнутого i -го контуру на зміну заданого значення в j -му контурі.

Частотну характеристику замкнутого контуру можна знайти, встановивши $s = j\omega$ у рівнянні (8), і її можна представити через w та λ наступним чином [19,20]

$$H(jw, \lambda) = G(jw)G_c(jw, \lambda)[1 + G(jw)G_c(jw, \lambda)]^{-1}. \quad (11)$$

Величина частотної характеристики визначається як амплітудний коефіцієнт замкнутого контуру AR , а його максимальна величина в діапазоні частот визначається як Mr .

Крива AR діагональних елементів повинна дорівнювати одиниці на якомога вищій частоті, щоб забезпечити відсутність зміщення та швидке наближення до нового стаціонарного стану, тоді як крива недіагональних елементів повинна бути якомога меншою [21].

Параметр Mr тісно пов'язаний зі стабільністю та продуктивністю замкнутої системи, і відповідну реакцію в часовій області можна вивести з його значення. Отже задачею процедури налаштування є визначення набору λ , що робить реакцію замкнутої системи достатньо швидкою та стабільною. Зазначеної мети в часовій області можна досягти, розв'язавши наступну задачу оптимізації в частотній області [19]

$$\min[\sum_i \sum_{j \neq i} Mp_{ij} + \sum_i Mp_{ii}], \quad (12)$$

$$Mp_{ij} \geq Mp_{low},$$

де $Mp_{ij} = \max_w H_{ij}$; Mp_{ij} – функція λ ; Mp_{low} – нижня межа діагоналі Mr ; w – ваговий коефіцієнт для діагоналі Mr .

Оскільки задача оптимізації складається лише з одного вектора змінних, можна легко знайти оптимальне значення λ для мінімізації взаємодії та перерегулювання в циклах, поки всі Mr_{ij} відповідають обмеженням.

Результати налаштування ПІД контролерів триконтурної САК (рис. 2) процесом буріння свердловин із застосуванням наведеного алгоритму показано на рис. 6, 7. Відповідні розрахунки виконувались у середовищі MATLAB®. На рис. 6 наведена реакція ПІД контролерів САК на стрибкоподібне збурення із застосуванням поширеного традиційного методу налаштування за найбільшим логарифмічним модулем (BLT) [3].

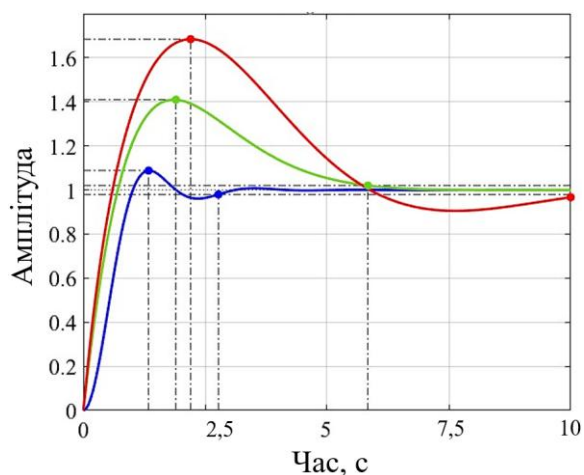


Рис. 6. Реакція ПІД контролерів триконтурної САК на стрибкоподібне збурення із застосуванням традиційного методу налаштування BLT

Відповідно до методу BLT налаштування Цильгера-Ніколса (Ziegler-Nichols) використовується для початкових налаштувань окремих контролерів, потім контролери розлаштовуються таким чином, щоб задовольнити критерій логарифмічного модуля.

На рис. 7 наведена реакція ПІД контролерів триконтурної САК на стрибкоподібне збурення із застосуванням дослідженого алгоритму [19].

Нижня межа діагоналі Mr обрана рівною 1,3. Мінімізація цільової функції, що відповідає рівнянню (12), робить реакцію системи стабільною, а обрані обмеження сприяють достатній її швидкості.

Таким чином, результати моделювання показують, що запропонований метод перевершує традиційні методи, такі як, наприклад, метод налаштування BLT [3] як за параметром часу перехідних процесів у замкнутих контурах, так і за величиною перерегулювання.

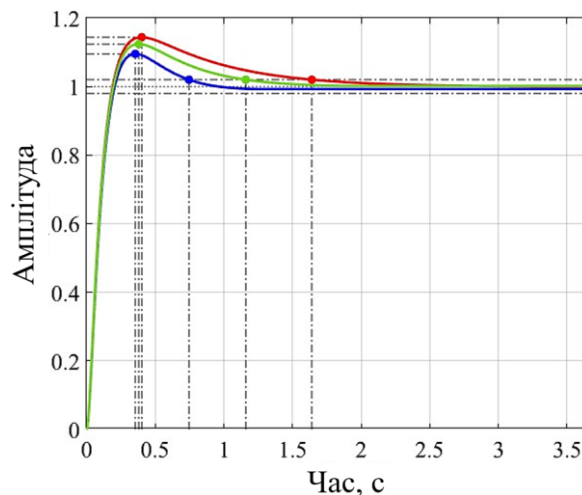


Рис. 7. Реакція ПІД контролерів триконтурної САК на стрибкоподібне збурення із застосуванням дослідженого частотного методу налаштування

Висновки. У досліджуваній ієрархічній системі автоматизованого керування процесом буріння свердловин на її нижньому рівні використана структура, що включає три контури на основі ПІД контролерів, які забезпечують регулювання швидкості обертання долота RPM, навантаження на долото WOB та параметрів системи очистки свердловини (перш за все, її продуктивності). Моделювання процесу буріння засвідчує тісний зв'язок між зазначеними параметрами, що потребує відповідного налаштування кожного контуру керування.

Більшість відомих методів налаштування багатоконтурних ПІД-контролерів схожі тим, що вони використовують правила налаштування одного контуру для отримання початкових значень для окремих контролерів, а потім розлаштовують окремі контури для збереження стабільності всієї системи. Промислова практика часто полягає в послідовному замиканні циклу з подальшим евристичним та консервативним розлаштуванням, що є складним і трудомістким процесом. В умовах реального виробничого процесу такий підхід на завжди дозволяє досягнути бажаних показників продуктивності та надійності керування.

Досліджено алгоритм налаштування багатоконтурних САК на основі ПІД контролерів, що реалізує узагальнений метод із внутрішньою моделлю ІМС. Застосовується критерій, що базується на визначенні параметрів частотної характеристики замкнутого контуру для досягнення бажаних показників продуктивності та надійності керування. Частотна характеристика замкнутого контуру

САК, отримується в результаті розрахунку вихідного сигналу системи у відповідь на синусоїдальний вхід.

Отримані результати свідчать про те, що налаштування триконтурної САК процесом буріння свердловин на основі ПД-регуляторів із застосуванням дослідженого методу дозволяють максимально точно досягнути бажаних показників продуктивності та надійності керування. Досліджений метод може бути використаний до динамічних моделей будь-якого порядку. При цьому характеристики зворотної реакції замкнутого контуру керування задаються заздалегідь. Крім того, в результаті виконання відповідного алгоритму отримується інформація про запаси стійкості та характеристики чутливості САК.

Література

1. Åström K.J., Hägglund T. Advanced PID Control. ISA, Research Triangle Park, NC, 2006.
2. João P.L. Coutinho, Lino O. Santos, Marco S. Reis. Bayesian Optimization for automatic tuning of digital multi-loop PID controllers. *Computers & Chemical Engineering*, Volume 173, May 2023, 108211. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2023.108211>
3. Luyben W.L. Simple method for tuning SISO controllers in multivariable systems. *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, 1986, 25 (3), pp. 654-660.
4. Hovd M., Skogestad S. Sequential design of decentralized controllers. *Automatica*, 1994, 30 (10), pp. 1601-1607.
5. Vu T.N.L., Lee M. Independent design of multi-loop PI/PID controllers for interacting multivariable processes. *J. Process Control*, 2010, 20 (8), pp. 922-33, 10.1016/j.jprocont.2010.06.012.
6. Shen S.-H., Yu C.-C. Use of relay-feedback test for automatic tuning of multivariable systems. *AIChE J.*, 1994, 40 (4), pp. 627-646. 10/1002/aic.690400408.
7. Halevi Y., Palmor Z., Efrati T. Automatic tuning of decentralized PID controllers for MIMO processes. *J. Process Control*, 1997, 7 (2), pp. 119-128, 10.1016/S0959-1524(97)82769-2.
8. Dittmar R., Gill S., Singh H., Darby M. Robust optimization-based multi-loop PID controller tuning: A new tool and its industrial application. *Control Eng. Pract.*, 2012, 20 (4), pp. 355-370. 1016/j.conengprac.2011.10.011.
9. Zhou, Z., Hu, Y., Liu, B., Dai, K., & Zhang, Y. Development of Automatic Electric Drive Drilling System for Core Drilling. *Applied Sciences*, 2023, 13(2), 1059. <https://doi.org/10.3390/app13021059>.
10. Galle E. M. and Woods H. B., Best Constant Weight and Rotary Speed for rotary Rock Bits, 1964, American Petroleum Institute.
11. Warren T. M. Drilling model for soft-formation bits. *Journal of Petroleum Technology*, 1981, 33, no. 6, <https://doi.org/10.2118/8438-PA>.
12. Andreas Nascimento, David Tamas Kutas, Asad Elmgerbi, Gerhard Thonhauser, Mauro Hugo Mathias. Mathematical Modeling Applied to Drilling Engineering: An Application of Bourgoyne and Young ROP Model to a Presalt Case Study. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015, 631290, p.9 <https://doi.org/10.1155/2015/631290>.
13. Dong-Yup Lee, Moonyong Lee, Yongho Lee, Sunwon Park. Multiloop PID controllers tuning for desired closed loop responses. *IFAC Proceedings*, 2001, Volumes 34(25), 407-413. DOI:10.1016/S1474-6670(17)33858-2.
14. Rainer Dittmar. Model Predictive Control mit MATLAB und Simulink - Model Predictive Control with MATLAB and Simulink. Published 04 December 2019, 212 p. Doi:10.5772/intechopen.86001. ISBN 978-1-83880-096-3.
15. Arkadiy Turevskiy PID Cont. roller Design for a DC Motor, 2024. <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/26275-pid-controller-design-for-a-dc-motor>.
16. DC Motor Speed: PID Controller Design. <https://ctms.engin.umich.edu/CTMS/index.php?example=MotorSpeed§ion=ControlPID>.
17. Harmse M, Dittmar R. Robuste Einstellung dezentraler PID-Regler in einer Mehrgrößenumgebung. *atp* edition, *Automatisierungstechnische Praxis*, 2013; 51(12), pp. 68-78.
18. Lee Y, Lee M., Park S. and Brosilow C. PID controller tuning for desired closed loop responses for SI/SO systems. *AIChE Journal*, 1998, 44, 106-115.
19. Dong-Yup Lee, Moonyong Lee, Yongho Lee, Sunwon Park. Multiloop PID controllers tuning for desired closed loop responses. *IFAC Proceedings*, 2001, Volumes 34(25), pp. 407-413. DOI:10.1016/S1474-6670(17)33858-2.
20. Lee Y, Park S. and Lee M. PID controller tuning to obtain desired closed loop responses for cascade control systems. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 1998, 37, 1859-1865.
21. Edgar T. E, Heeb R. and Hougen I. O. Computer-aided process control system design using interactive graphics. *Computers Chem. Eng.*, 1981, 5, pp. 225-232.

Morkun V.S., Morkun N.V., Bobrov E.Y., Hryshchenko Y.O. Modeling of a multi-circuit system for automated control of the well drilling process based on subcontrollers

Decentralized automated control systems (ACS) based on proportional-integral-differential (PID) controllers remain the most common solution for controlling industrial processes with multiple inputs and outputs (MIMO). This is due to their flexibility, simplicity, and inherent fault tolerance compared to centralized control structures. Even when more sophisticated strategies, such as model predictive control (MPC), are applied, PID controllers are usually used at lower control levels of the respective systems. The paper considers an automated control system for the well drilling process implemented on the basis of an electric drive. In the studied hierarchical ACS, a structure is used at its lower level that includes three circuits based on proportional-integral-differential (PID) controllers that provide control of the bit rotation speed RPM, the bit load WOB, and the parameters of the well cleaning system (primarily its performance). Drilling process modeling shows a close relationship between these parameters, which requires appropriate adjustment of each control loop. The optimal tuning of decentralized PID controllers in multi-loop ACS remains a difficult and complex task. Most of the known methods of tuning multi-loop PID controllers are similar in that they use the tuning rules of one loop to obtain initial values for individual controllers, and then detune the individual loops to maintain the stability of the entire system. In the conditions of a real production process, this approach does not always allow achieving the desired performance and control reliability. An algorithm for tuning multicircuit SACs based on PID controllers, which implements the generalized internal model method

(IMC), is investigated. A criterion based on determining the parameters of the closed-loop frequency response is used to achieve the desired performance and control reliability. The frequency response of the closed-loop ACS is obtained by calculating the system output signal in response to a sinusoidal input. The results obtained indicate that the tuning of a three-circuit ACS based on PID controllers using the investigated method allows achieving the most accurate compliance with the desired performance and control reliability. The investigated method can be applied to dynamic models of any order. In this case, the feedback characteristics of the closed-loop control are set in advance. In addition, as a result of the corresponding algorithm, information is provided on the stability margins and sensitivity characteristics of the ACS.

Keywords: drilling, modeling, automated control, multi-loop system, controller.

Моркун Володимир Станіславович – д-р техн. наук, проф., професор Криворізького національного університету (Кривий Пір), morkunv@gmail.com.

Моркун Наталя Володимирівна – д-р техн. наук, проф., професор Львівського національного університету імені Івана Франка (Львів), nmorkun@gmail.com.

Бобров Євген Юрійович – аспірант, Криворізького національного університету (Кривий Пір), smgrischenko@gmail.com.

Грищенко Ярослав Олександрович – аспірант Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля (Київ), grischenckokgtl@gmail.com.

Стаття подана 15.05.2025.