

# Наука і сучасні технології

УДК 681.5.015:622.24

## СПОСІБ ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ НАЛАШТУВАННЯ ПІД-РЕГУЛЯТОРА СИСТЕМИ АНТИПОМПАЖНОГО РЕГУЛЮВАННЯ І ЗАХИСТУ КОМПРЕСОРА ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНОГО АГРЕГАТУ ДОКАЧУЮЧОЇ КОМПРЕСОРНОЇ СТАНЦІЇ ПІДЗЕМНОГО СХОВИЩА ГАЗУ

Г.Н.Семенцов, С.Г.Гіренко

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 46067  
e-mail: kafa t p @ u k r . n e t

*Рассматривается метод определения оптимальных параметров настройки ПИД-регулятора системы антипомпажного регулирования и защиты компрессора газоперекачивающего агрегата дожимной компрессорной станции подземного хранилища газа.*

*In the paper a new method of determination of optimum parameters of tuning of PID-regulator of the system of antipompage controller and sewn up compressor of the compressor station of dug-out of gas is presented.*

Відомо [1÷7], що автоматичні системи регулювання складними неперервними технологічними процесами в промисловості будуються, як правило, із застосуванням типових П- та ПІ-алгоритмів регулювання. Широке розповсюдження цих алгоритмів пояснюється простотою їх налаштування. Крім того, вони забезпечують достатню для багатьох об'єктів динамічну точність системи автоматичного регулювання, але головною їх перевагою є робастність. Робастний алгоритм регулювання працездатний при різноманітних варіаціях характеристик об'єкта регулювання і відхиленнях від оптимальних значень параметрів налаштування регулятора при збереженні необхідних показників якості системи.

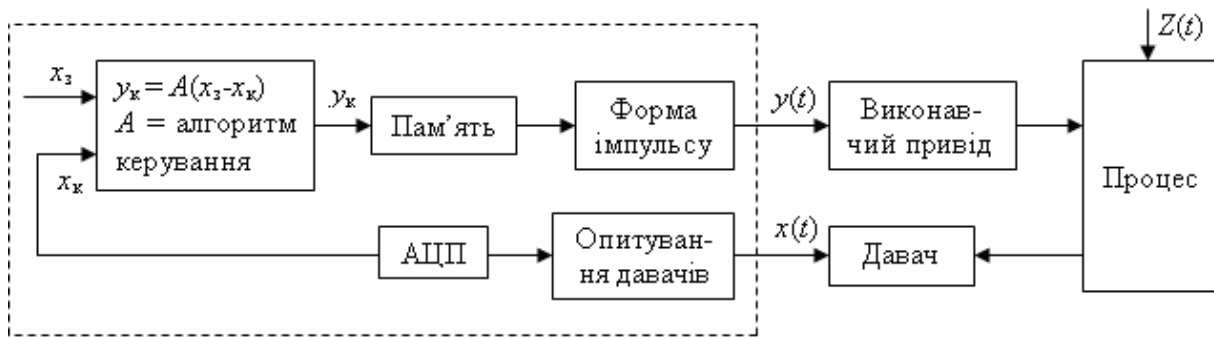
Проте, одним із методів підвищення швидкодії та динамічної точності автоматичних систем регулювання є удосконалення алгоритму регулювання. Аналіз літературних джерел [1,2,3 та ін.] та виробничого досвіду довів, що найбільш досконалий із типових алгоритмів регулювання – ПІД-алгоритм – не отримав такого ж широкого розповсюдження на практиці як П- і ПІ-алгоритми, хоча ПІД-регулятор може підвищувати динамічну точність автоматичної системи в порівнянні з ПІ-регулятором на один або навіть два порядки [2, 3]. Головними причинами обмеженого застосування ПІД-алгоритму є висока чутливість до варіацій системи і

складність налаштування параметрів регулятора. Для керованих об'єктів без запізнень або з малим запізненням при низькочастотних збуреннях ПІД-алгоритм наближається до оптимального вінеровського алгоритму і є неробастним. При великому запізненні вираш при переході від ПІ-алгоритму керування до ПІД-алгоритму суттєво зменшується [3].

Враховуючи, що компресор газоперекачувального агрегату практично є об'єктом без запізнення, розглянемо спосіб визначення оптимальних параметрів налаштування ПІД-регулятора системи антипомпажного регулювання.

Будемо виходити з того, що в системі антипомпажного регулювання, яка реалізована на сучасній дискретній комп'ютерній техніці фірми Siemens, використовуються лінійні ПІ- та ПІД-алгоритми, а регулятор повинен бути коректно налаштований.

Складність проблеми оптимального параметричного синтезу регулятора зумовила появу нових пошукових, графо-аналітичних, аналітичних, наближених методів визначення параметрів налаштування ідеального ПІД-регулятора [5]. Проте, незалежно від методики розрахунку параметрів налаштування регулятора, їх значення визначаються характеристиками об'єкта, забезпеченням заданого запасу стійкості системи і вибраним явним або неявним критерієм якості. При цьому, як правило, не приділяється



$Z(t)$  – збурюючий вплив,  $x_z$  – задане значення керованої величини,  $x_k$  – контрольоване значення керованої величини,  $u(t)$  – керуючий вплив

Рисунок 1 — Підсистема дискретного антипомпажного регулювання ДКС ПСГ

належна увага проблемі робастності автоматичної системи регулювання з ПД-алгоритмом і особливостям, що зв'язані з цифровою реалізацією алгоритму керування.

Характерною особливістю антипомпажного регулювання є неможливість використання аналогових регуляторів, оскільки при виявленні помпажних явищ необхідно здійснювати форсоване відкриття антипомпажного клапану. Ця проблема вимагає проведення аналізу і корекції багатьох положень, які склалися в процесі розробки методів синтезу неперервних систем автоматичного керування [6]. Сказане стосується і дискретно-неперервної системи антипомпажного керування компресором докачуючої компресорної станції (ДКС) підземного сховища газу (ПСГ), в якій дискретність обумовлена дискретним характером інформації від давача керованої величини та дискретним характером керуючих впливів від регулятора.

Розглянемо аналітичний метод визначення оптимальних параметрів налаштування регулятора з дискретним ПД-алгоритмом без обмежень на структуру і параметри функції передачі керованого об'єкта. Функціональна структура підсистеми – одноконтурна (рис. 1).

Отже, розглядається дискретна система керування, у якій керуючий вплив формується через постійний інтервал часу, після чого розраховується нове значення керуючої змінної як функції сигналу розузгодження. Як обмеження, що визначає запас стійкості системи, вибираємо умову, що сукупність коренів характеристичного рівняння замкнутої системи

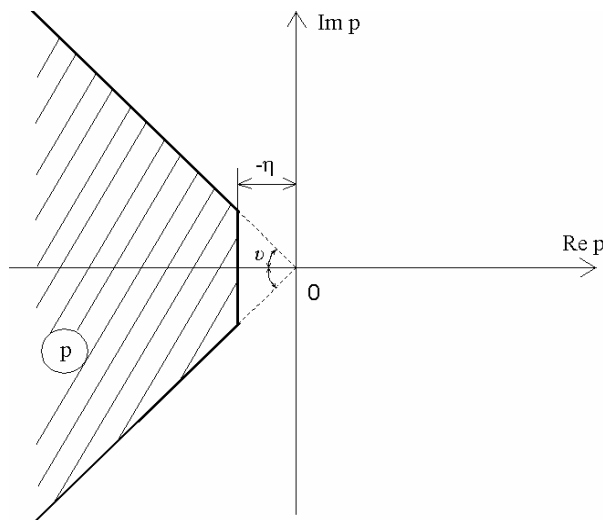
$$p_k = -\alpha_k \pm j\beta_k$$

не має коренів, для яких кореневий показник

коливальності  $\mu_k = \frac{|\beta_k|}{|\alpha_k|}$  перебільшує задане

значення  $\mu$  [1,2]. На площині коренів (рис. 2) ступеню коливальності системи  $\mu$  відповідає сектор між двома симетричними променями, які утворюють з дійсною віссю кут

$$V = \arctg \mu = \arctg \frac{|\beta|}{|\alpha|}$$



$\eta$  – запас стійкості,  $V$  – ступінь (запас) коливальності  $Im p/Re p \leq V$

Рисунок 2 – Область бажаного розташування коренів характеристичного поліному замкнутої системи антипомпажного регулювання

Ступінь коливальності однозначно пов'язаний зі ступенем затухання  $\psi$ . Звичайно, в автоматичних системах ступінь затухання  $\psi \geq 0,90 \div 0,98$ . Цим значенням відповідає ступінь коливальності  $\mu \leq 2,72 \div 1,57$ .

Врахуємо, що максимальна швидкодія системи автоматизованого та антипомпажного регулювання може бути досягнута за рахунок вибору потрібних параметрів окремих ланок системи та параметрів налаштування ПД-регулятора. Оскільки найшвидший аперіодичний перехідний процес має місце, коли усі  $n$  корені характеристичного рівняння замкнутої системи рівні між собою, то це завдання було вирішено на стадії проектування, виготовлення і підготовки до експлуатації системи автоматизованого та антипомпажного регулювання.

Для досягнення максимальної швидкодії системи, яка, як відомо [6], можлива при невеликій коливальності, коли перерегулювання  $\sigma \leq 10\%$ , всі комплексні корені розміщені на однаковій відстані  $\eta$  від уявної осі, а уявні частки утворюють арифметичну прогресію з різ-

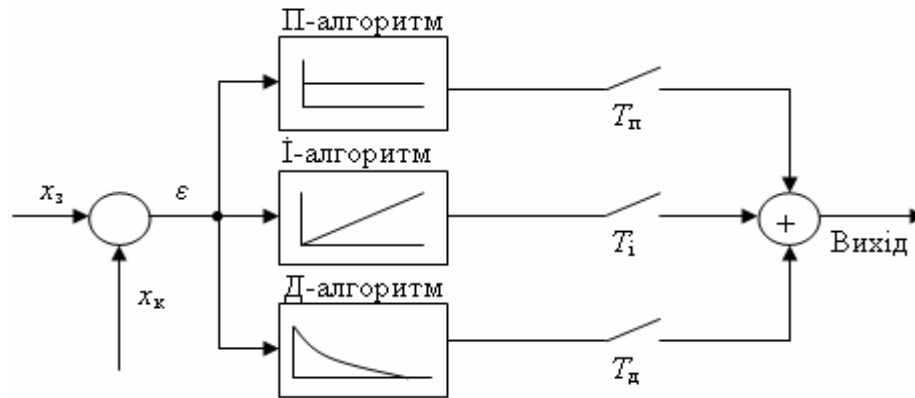
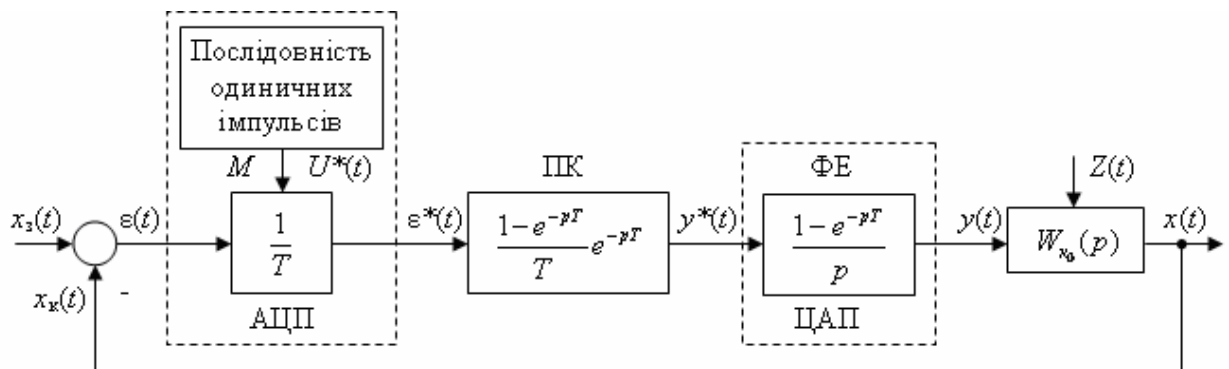


Рисунок 3 – Структура дискретного ПІД-регулятора



ФЕ – формуючий елемент, ПК – програмований контролер, М – модулятор, Z(t) – збурюючий вплив, W<sub>ко</sub>(p) – функція передачі керованого об'єкта – компресора ГПА, x(t) – керована величина, x<sub>3</sub>(t) – задане значення і x<sub>к</sub>(t) – контрольоване значення керованої величини

Рисунок 4 – Блок-схема дискретної системи антикомпажного регулювання з програмованим контролером

ницею  $\Delta\beta = \beta_1$ . Для рівняння третього порядку оптимальне відношення  $\frac{\Delta\beta}{\eta}$  дорівнює 1,45.

Задача оптимального параметричного синтезу такої системи заключаються у визначенні параметрів налаштування ПІД-регулятора.

На рис. 3 зображено паралельну структуру ПІД-регулятора, яка являє собою спеціальний вид математичної обробки сигналу в регуляторі, при якій П-, І- та Д-компоненти працюють паралельно й незалежно одна від одної і лише після обробки результати об'єднуються.

Алгоритм керування для дискретного регулятора, який реалізується програмним методом, можна одержати із ідеального ПІД-алгоритму [6]

$$Y(t) = K_{\text{П}} \varepsilon(t) + K_{\text{І}} \int_0^t \varepsilon(t) dt + K_{\text{Д}} \frac{d\varepsilon(t)}{dt},$$

де: Y(t) – керуючий вплив;

K<sub>П</sub>, K<sub>І</sub>, K<sub>Д</sub> – передавальні коефіцієнти пропорційної, інтегральної та диференційної складових алгоритму керування (параметри налаштування);

ε(t) – сигнал розузгодження системи.

Тоді дискретний ПІД-алгоритм регулювання матиме такий вигляд [4]:

$$W_{\text{ПІД}}(z) = K_{\text{П}} + K_{\text{І}} T \frac{Z}{Z-1} + K_{\text{Д}} T^{-1} (1 - Z^{-1}),$$

де: T – крок дискретизації,

$$Z = e^{pT}, \text{ звідки } p = \frac{1}{T} \ln Z.$$

Обмежимося виведенням формул розрахунків для одномірної автоматичної системи антикомпажного регулювання з типовим дискретним алгоритмом керування.

Враховуючи вище наведене, характеристичне рівняння замкненої одномірної дискретно-неперервної системи (рис. 4) антикомпажного регулювання можна представити у такому вигляді:

$$1 + W_{\text{pc}}(Z) = 0, \tag{1}$$

де

$$W_{\text{pc}}(Z) = W_p(Z) \cdot W_{\text{ко}} W_{\text{ф}}(Z) - \tag{2}$$

– функція передачі розумнотуї системи;

W<sub>ко</sub> W<sub>ф</sub>(Z) – Z-перетворення добутку відповідних функцій передачі керованого об'єкта і формуючого елементу [3] з функцією передачі

$$W_p(p) = \frac{1 - e^{-pT}}{p};$$

W<sub>p</sub>(Z) – функція передачі дискретного регулятора.

Припустимо, що з урахуванням заданого запасу стійкості за критерієм  $\mu$  [6]

$$Z = e^{-\mu\omega T} \cdot e^{j\omega T} = e^{-\mu\omega T + j\omega T}, \quad (3)$$

де  $j\omega = p$ .

Тоді вираз (2) набуде такого вигляду:

$$W_{pc}(\mu, T, j\omega) = W_p(\mu, T, j\omega) \cdot W_{ko} W_\phi(\mu, T, j\omega). \quad (4)$$

Розглянемо визначення параметрів налаштування для дискретного ПД-алгоритму, амплітудно-фазова частотна характеристика (АФЧХ) якого записується так [7]:

$$W_{ko}(\mu, T, j\omega) = K_{II} + \quad (5)$$

$$+ K_I \frac{T}{1 - e^{-\mu\omega T + j\omega T}} + K_D \frac{1 - e^{-\mu\omega T + j\omega T}}{T}.$$

Розширену АФЧХ керованого об'єкта представимо у вигляді двох складових – уявної  $Im$  і дійсної  $Re$ :

$$W_{ko} W_\phi(\mu, T, j\omega) = \quad (6)$$

$$= Re_{ko} Re_\phi(\mu, T, \omega) + j Im_{ko} Im_\phi(\mu, T, \omega).$$

Врахуємо також, що

$$e^{-j\omega T} = \cos\omega T - j \sin\omega T. \quad (7)$$

Після підстановки формул (4)÷(7) в рівняння (2) і відокремлення дійсної і уявної складових, отримаємо таку систему із двох рівнянь:

$$K_{II} Re_{ko} Re_\phi(\mu, T, \omega) + K_I \frac{T}{1 - 2e^{\mu\omega T} \cos\omega T + e^{2\mu\omega T}} \times$$

$$\times [Re_{ko} Re_\phi(\mu, T, \omega)(1 - e^{\mu\omega T} \cos\omega T) +$$

$$+ Im_{ko} Im_\phi(\mu, T, \omega)e^{\mu\omega T} \sin\omega T] + \quad (8)$$

$$+ K_D \frac{1}{T} [Re_{ko} Re_\phi(\mu, T, \omega)(1 - e^{\mu\omega T} \cos\omega T) -$$

$$- Im_{ko} Im_\phi(\mu, T, \omega)e^{\mu\omega T} \sin\omega T] + 1 = 0;$$

$$K_{II} Im_{ko} Im_\phi(\mu, T, \omega) + K_I \frac{T}{1 - 2e^{\mu\omega T} \cos\omega T + e^{2\mu\omega T}} \times$$

$$\times [Im_{ko} Im_\phi(\mu, T, \omega)(1 - e^{\mu\omega T} \cos\omega T) -$$

$$- Re_{ko} Re_\phi(\mu, T, \omega)e^{\mu\omega T} \sin\omega T] + \quad (9)$$

$$+ K_D \frac{1}{T} [Re_{ko} Re_\phi(\mu, T, \omega)(1 - e^{\mu\omega T} \sin\omega T) +$$

$$+ Im_{ko} Im_\phi(\mu, T, \omega)(1 - e^{\mu\omega T} \cos\omega T)] = 0.$$

Розв'язавши систему рівнянь (8), (9) відносно параметрів  $K_{II}$  та  $K_I$  налаштування регулятора, отримали формули для меж заданого запасу стійкості за критерієм  $\mu$ . Вони виражені на базі дійсної та уявної амплітудно-фазової частотної характеристики еквівалентного [4] дискретного керованого об'єкта:

$$K_{II}(\mu, T, \omega) = - \left\{ Re_{ko} Re_\phi(\mu, T, \omega) e^{\mu\omega T} \sin\omega T - \right.$$

$$\left. - Im_{ko} Im_\phi(\mu, T, \omega)(1 - e^{\mu\omega T} \cos\omega T) \right\} \times$$

$$\times \left\{ e^{\mu\omega T} \sin\omega T \left( Re_{ko} Re_\phi^2(\mu, T, \omega) + \right. \right.$$

$$\left. \left. + Im_{ko} Im_\phi^2(\mu, T, \omega) \right) \right\}^{-1} - 2K_D \frac{1}{T} (1 - e^{\mu\omega T} \cos\omega T), \quad (10)$$

$$K_{II}(\mu, T, \omega) = - \frac{1}{T} \left\{ Im_{ko} Im_\phi(\mu, T, \omega) \times \right.$$

$$\left. \times (1 - 2e^{\mu\omega T} \cos\omega T + e^{2\mu\omega T}) \right\} \times \quad (11)$$

$$\times \left\{ e^{\mu\omega T} \left( Re_{ko} Re_\phi^2(\mu, T, \omega) + Im_{ko} Im_\phi^2(\mu, T, \omega) \right) \right\}^{-1} +$$

$$+ K_D \frac{1}{T^2} (1 - 2e^{\mu\omega T} \cos\omega T + e^{2\mu\omega T}).$$

Формули (10) і (11) можна переписати через розширені амплітудно-частотну і фазо-частотну характеристики, використовуючи відомі вирази [6]:

$$Re_{ko} Re_\phi(\mu, T, \omega) =$$

$$= A_{ko} A_\phi(\mu, T, \omega) \cdot \cos\varphi_{ko} \varphi_\phi(\mu, T, \omega), \quad (12)$$

$$Im_{ko} Im_\phi(\mu, T, \omega) =$$

$$= -A_{ko} A_\phi(\mu, T, \omega) \cdot \sin\varphi_{ko} \varphi_\phi(\mu, T, \omega), \quad (13)$$

Тоді отримаємо такі формули для ПД-алгоритму регулювання:

$$K_{II}(\mu, T, \omega) = - \frac{\cos\varphi_{ko} \varphi_\phi(\mu, T, \omega)}{A_{ko} A_\phi(\mu, T, \omega)} +$$

$$+ \frac{\sin\varphi_{ko} \varphi_\phi(\mu, T, \omega) \cdot (1 - e^{\mu\omega T} \cos\omega T)}{e^{\mu\omega T} \sin\omega T \cdot A_{ko} A_\phi(\mu, T, \omega)} - \quad (14)$$

$$- 2K_D \frac{1}{T} (1 - e^{\mu\omega T} \cos\omega T),$$

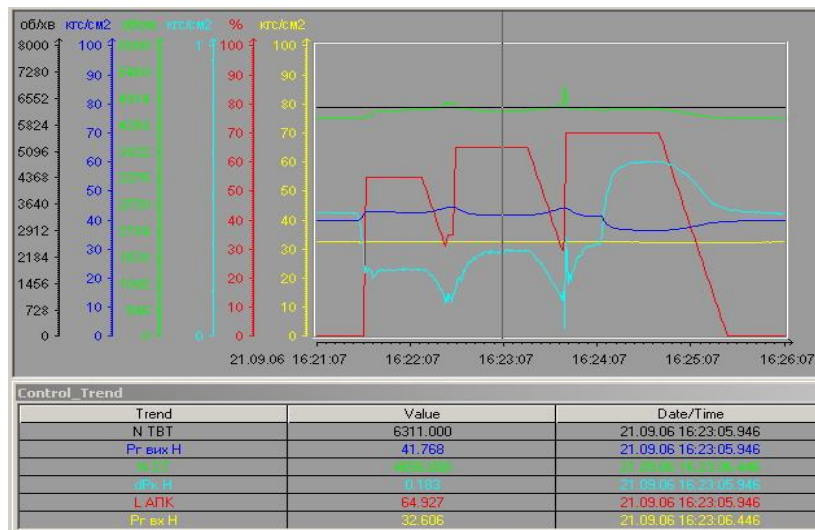
$$K_I(\mu, T, \omega) = \frac{1}{T} \cdot \frac{1 - 2e^{\mu\omega T} \cdot \cos\omega T + e^{2\mu\omega T}}{e^{\mu\omega T} \sin\omega T} \times$$

$$\times \frac{\sin\varphi_{ko} \varphi_\phi(\mu, T, \omega)}{A_{ko} A_\phi(\mu, T, \omega)} + \quad (15)$$

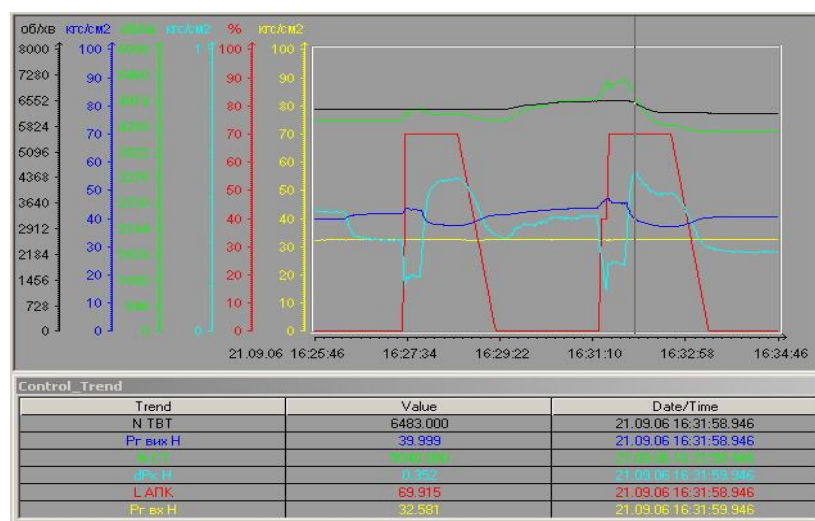
$$+ K_D \frac{1}{T^2} (1 - 2e^{\mu\omega T} \cos\omega T + e^{2\mu\omega T}).$$

Користуючись формулами (8) і (9), можна отримати ПІ- і ПД-алгоритми регулювання, а із ПІ-алгоритму – І-алгоритм і П-алгоритм регулювання.

Якщо у формулах (6)÷(15) зменшити крок дискретизації, то при  $T \rightarrow 0$  вони сходяться до відомих розрахункових формул параметрів налаштування неперервних алгоритмів керування [4, 6]. В цьому випадку повинні виконуватись умови еквівалентності імпульсних і неперервних систем Ципкіна Я.З.:



а)



б)

Рисунок 5 – Приклади дискретного захисту і регулювання рециркуляцією нагнітача в помпажному режимі (ГПА №9 ДКС ПСГ «Більче-Волиця»)

$$\omega_d \ll 2 \omega_{нп},$$

$$\omega_x \gg \omega_d - \omega_{нп},$$

де:  $\omega_d$  – частота дискретизації;  
 $\omega_{нп}$  – частота, яка визначає смугу пропускання частот неперервної частини системи;  
 $\omega_x$  – максимальна частота зовнішнього впливу на вході імпульсного елемента.

При виконанні умов Ципкіна Я.З. імпульсний елемент можна не враховувати і розглядати систему регулювання як неперервну. Проте, при збільшенні кроку дискретизації  $T$  спостерігається зменшення області заданого запасу стійкості системи.

Система антипомпажного регулювання і захисту компресора газоперекачувального агрегату з дискретним ПІД-регулятором фірми Siemens розроблена, виготовлена і впроваджена на ГПА № 9 ДКС ПСГ «Більче-Волиця». На графіках, зображених на рис. 5, (параметр  $L_{апр}$ ) – показано приклад дискретного захисту і регулювання рециркуляцією нагнітача в помпажному режимі. Різкий стрибок вверх (вертикальна ділянка) – це відкриття АПК (на різні значення %) що забезпечує рециркуляцію і стабілі-

зацію (горизонтальна ділянка) режиму роботи ГПА. Плавне (з темпом 2%/сек) закриття клапана, аж до значення "0" – це автоматичне повернення до режиму "завантаження нагнітача в Магістраль"

### Висновок

Аналіз результатів параметричного синтезу дозволяє виявити деякі властивості системи антипомпажного регулювання компресорів ДКС ПСГ з ПІД-алгоритмами регулювання:

- область заданого запасу стійкості в просторі параметрів налаштування регулятора обмежується складною немонотонною поверхнею;
- динамічна точність системи антипомпажного регулювання забезпечується із збільшенням відношення значень сталої диференціювання  $T_d$  до сталої інтегрування  $T_i$ , але це відношення не може перебільшувати деякого критичного значення  $\alpha_{кр} = T_d/T_i$ , ( $\alpha_{кр} \in [0,2 \div 0,4]$ ) залежно від властивостей керуваного об'єкта, оскільки при перевищенні  $\alpha_{кр}$  динамічна точність зменшується;

• збільшення  $\alpha_{кр}$  призводить до зростання чутливості системи щодо варіації параметрів налаштування регулятора, тобто до зменшення робастності.

### Література

1 Ротач В.Я. Автоматизированная настройка ПИД-регуляторов – экспертные и формальные методы // Теплоэнергетика. – 1995. – № 10. – С. 9-16.

2 Волгин В.В., Панько М.А. Расчет настроек автоматических систем регулирования. – М.: Изд. МЭИ, 1973. – 127 с.

3 Панько М.А., Аракелян Э.К., Усенко В.В. Сравнительный анализ классического и нечеткого ПИД-алгоритмов // Теория и практика построения и функционирования АСУТП. – М.: Изд. МЭИ, 1998. – С. 119-126.

4 Юлиус Т.Ту. Цифровые и импульсные системы автоматического управления. – М.: Машиностроение, 1964. – 704 с.

5 Панько М.А., Иванов А.В. К расчету оптимальных настроек ПИД-регуляторов // Теория и практика построения и функционирования АСУТП. – М.: Изд. МЭИ, 1998. – С. 35-43.

6 Семенцов Г.Н. Теория автоматического керування. – Івано-Франківськ: Факел, 1999. – 610 с.

7 Панько М.А. К расчету оптимальных настроек ПИД-регулятора при цифровой реализации алгоритма // Теория и практика построения и функционирования АСУТП. – М.: Изд. МЭИ, 1993. – С. 45-49.

УДК 622.276.6

## ПРО НОВИЙ ПІДХІД У ТЕХНІЦІ ТА ТЕХНОЛОГІЇ МЕТОДУ ОЧИЩЕННЯ ПРИВИБІЙНОЇ ЗОНИ ПЛАСТА ДЕПРЕСІЙНО-РЕПРЕСІЙНОЮ ДІЄЮ

Я. Б. Тарко

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42195

e-mail: jart\_b@ukr.net

*Проанализированы основные причины снижения продуктивности скважин и обоснована целесообразность очистки призабойной зоны пласта путем создания циклов высоких депрессий и репрессий давления. Описаны новое устройство для создания гидроимпульсного воздействия на пласт и технология проведения работ в скважинах.*

*The main reasons for the decrease of wells' productivity have been analyzed and the expedience of cleaning of bottom hole zone of the layer by creation of cycles of high depressions and repressions of pressure has been grounded. New device for creation of hydro-impulse influence on the layer and the technology of operation' carrying out on the wells have been described.*

Ефективність функціонування народного господарства країни залежить від ступеня забезпеченості енергоносіями, в першу чергу нафтою та газом. Власний видобуток в Україні нафти становить близько 10%, а газу – 20 % від потреб, тому ця проблема постає особливо гостро. Оскільки перспективи відкриття нових крупних родовищ вуглеводнів ближчим часом невеликі, то пріоритетного значення набуває розроблення нових ефективних технологій та технічних засобів відновлення та збільшення продуктивності діючих свердловин.

Проведений аналіз експлуатації діючого фонду нафтогазовидобувних свердловин ВАТ „Укрнафта” засвідчив, що 61,8% з них працювали з дебітом до 1 т/добу, а кількість тих, які мають дебіт понад 10 т/добу становила лише 16%. Основною причиною низької продуктивності є висока обводненість продуктивних пластів, оскільки 44,4% цих свердловин працюють з вмістом води 90% і більше. Водночас, 20,3% свердловин цієї групи мають обводненість 30% і менше, а 14,1% із них – практично

безводні. Ці результати свідчать про те, що свердловин, в яких необхідно застосовувати методи інтенсифікації припливу нафти та газу є значна кількість і це підтверджує необхідність активізувати розроблення ефективних технологій відновлення дебітів і їх велику перспективність у забезпеченні додаткового видобутку нафти і газу.

Промисловий досвід експлуатації свердловин, а також результати теоретичних та експериментальних досліджень проблем їх гідродинамічної досконалості, свідчать, що зниження продуктивності пластів відбувається через кольматацию привибійної зони, причому це явище є результатом проявів багатьох різних за природою чинників, в тому числі складних фізичних, хімічних і молекулярних процесів.

Основна кольматация пластів відбувається під час їх первинного розкриття і в подальшому поглиблюється при вторинному розкритті та в процесі експлуатації свердловин. Особливо гостро ця проблема постає під час розробки покладів нафти з підвищеним вмістом високомо-