

## СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО АНТИПОМПАЖНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ВІДЦЕНТРОВОГО НАГНІТАЧА ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНОГО АГРЕГАТУ

<sup>1</sup>Г.Н. Семенцов, <sup>2</sup>С.Г. Гіренко, <sup>1</sup>А.І. Лагойда

<sup>1</sup>ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 46067,  
e-mail: kafatp@ukr.net

<sup>2</sup>ВАТ «Українські газові технології», 76019, м. Київ, бульвар. І.Лепсе, 16а,  
тел. (044) 2063610

Здійснено структурно-параметричну оптимізацію підсистеми дискретного антипомпажного регулювання відцентрового нагнітача газоперекачувального агрегату дотискувальної компресорної станції підземного сховища газу (ВН ГПА ДКС ПСГ). Враховуючи, що ВН ГПА ДКС практично є об'єктом другого порядку без запізнення, конфузор – безінерційною ланкою, а виконавчий механізм – аперіодичною ланкою першого порядку, запропоновано використати ПІД-регулятор.

Для визначення параметрів налаштування ПІД-регулятора скористались методом Ціглера-Нікольса в математичному редакторі Mathcad і певними співвідношеннями для даної системи. У результаті отримали параметри налаштування ПІД-регулятора.

Розроблена система антипомпажного регулювання впроваджена на ДКС ПСГ «Більче-Волиця». Показано, що при дискретному антипомпажному регулюванні система фіксує виникнення помпажу і форсовано відкриває антипомпажний клапан. Після стабілізації і зникнення помпажних коливань антипомпажний клапан автоматично закривається. При повторному виникненні помпажу система повторно здійснює форсоване відкриття антипомпажного клапана.

Ключові слова: антипомпажне керування, структурно-параметрична оптимізація, газоперекачувальний агрегат, ПІД-регулятор, параметри налаштування.

Осуществлена структурно-параметрическая оптимизация подсистемы дискретного антипомпажного регулирования центробежного нагнетателя газоперекачивающего агрегата дожимной компрессорной станции подземного хранилища газа (ЦН ГПА ДКС ПХГ). Учитывая, что ЦН ГПА ДКС практически является объектом второго порядка без запаздывания, конфузор - безинерционным звеном, а исполнительный механизм - аперiodическим звеном первого порядка, предложено использовать ПИД-регулятор.

Для определения параметров настройки ПИД-регулятора воспользовались методом Циглер-Никольса в математическом редакторе Mathcad и определенными соотношениями для данной системы. В результате получили параметры настройки ПИД-регулятора.

Разработанная система антипомпажного регулирования внедрена на ДКС ПХГ «Бильче-Волица». Показано, что при дискретном антипомпажном регулировании система фиксирует возникновение помпажа и форсированно открывает антипомпажный клапан. После стабилизации и исчезновения помпажных колебаний антипомпажный клапан автоматически закрывается. При повторном возникновении помпажа система повторно осуществляет форсированное открытие антипомпажного клапана.

Ключевые слова: антипомпажное регулирование, структурно-параметрическая оптимизация, газоперекачивающий агрегат, ПИД-регулятор, параметры настройки.

*A structural and parametric optimization of a subsystem of discrete antisurging regulation of centrifugal supercharger of gas compressing unit of underground gas storage booster compressor station. Given that the centrifugal supercharger of gas compressing unit of booster compressor station is practically an object of a second order without delay, the confusor is an inertialess link, and executive mechanism is an aperiodic part of the first order, the usage of PID controller is suggested.*

*In order to determine the setting parameters for PID controller, Ziegler-Nichols method in a mathematic editor Mathcad was used together with certain correlations for a given system. As a result, setting parameters for PID controller were obtained.*

*The developed system of antisurging regulation has been introduced at Bilche-Volytsya of underground gas storage booster compressor station. It shows that during the discreet antisurging regulation the system fixes surging occurrence and opens an antisurging valve forcefully. After the stabilization and disappearance of surging fluctuations, an antisurging valve is closed automatically. Repeated occurrence of surging makes the system iteratively open an antisurging valve forcefully.*

Keywords: antypompazhne control, structural and parametric optimization, compressor units, PID-regulator settings.

**Вступ.** Структурно-параметрична оптимізація підсистеми дискретного антипомпажного регулювання відцентрових нагнітачів (ВН) газоперекачувальних агрегатів (ГПА) дотискува-

льних компресорних станцій (ДКС) підземних сховищ газу (ПСГ) є актуальною науково-прикладною задачею у зв'язку з недостатньою швидкістю існуючих систем антипомпажного

**Таблиця 1 – Основні характеристики систем регулювання**

<b>Найменування</b>	<b>МСКУ-СС 4510</b>	<b>ЛІС 4510</b>	<b>ПК 4510</b>
<b>Кількість входів і виходів:</b>			
– аналогових входів	80	32	32
– дискретних входів	20	120	120
– частотних входів	4	-	-
– дискретних виходів	100	32	32
– аналогових виходів	4	-	-
<b>Швидкодія:</b>			
– по каналах управління (цикл оновлення вихідних сигналів)	≤ 0,25с	≤ 0,1с	≤ 0,1с
– по каналах регулювання (цикл оновлення вихідних сигналів)	≤ 10 мс	-	-
<b>Метрологічні характеристики:</b>			
Основна приведена похибка:			
– по каналах вимірювання технологічних параметрів (крім частоти обертання)	±0,5%	±0,5%	±0,5%
– по каналах вимірювання частоти обертання	±0,1%	-	-
<b>Показники надійності:</b>			
– середнє напрацювання до відмови	≥ 250000 год.	≥ 250000 год.	≥ 500000 год.
<b>Напруга живлення:</b>			
– основна мережа 220 В, 50 Гц	-	-	-
– резервна мережа 220 В	-	-	-
<b>Потужність, яка споживається:</b>			
– від мережі 220 В, 50 Гц	≤ 1,5 кВА	≤ 0,5 кВА	≤ 0,4 кВА
– від мережі 220 В (за відсутності мережі 220 В, 50 Гц)	≤ 1 кВА	≤ 0,4 кВА	≤ 0,25 кВА
<b>Стійкість до зовнішніх впливів:</b>			
– температури і вологості оточуючого повітря	- 40...+50 <sup>0</sup> С, відносна вологість 95% при 35 <sup>0</sup> С (в блок-боксі) +5...+50 <sup>0</sup> С, відносна вологість 80% при 35 <sup>0</sup> С (в шафі для приладів)	- 40...+50 <sup>0</sup> С, відносна вологість 95% при 35 <sup>0</sup> С (в блок-боксі) +5...+50 <sup>0</sup> С, відносна вологість 80% при 35 <sup>0</sup> С (в шафі для приладів)	+5...+50 <sup>0</sup> С в шафі для приладів
– вібрації	група 3 по ГОСТ 12997	група 3 по ГОСТ 12997	група 3 по ГОСТ 12997

регулювання, які не забезпечують надійну роботу і захист компресорів на ДКС ПСГ.

Попри те, що методи й алгоритми антипомпажного захисту ВН все більшою мірою стають невід'ємними елементами систем автоматичного керування ГПА, до цього моменту не розроблено ефективних швидкодіючих методів захисту компресорів ДКС ПСГ від помпажу.

Принципове вирішення даного завдання можливе шляхом використання динамічних методів, що базуються на ефекті виявлення коливань у проточній частині компресора, застосуванням малоінерційних ланок системи керування і оптимального кроку дискретизації.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

Аналіз літературних джерел [1,2,3 та ін.] свідчить, що всі відомі методи мають технологічні, технічні і вартісні обмеження у застосуванні, а об'єм проведених досліджень в контексті підвищення швидкодії систем автоматичного антипомпажного регулювання явно недостатній.

Провідною установою з питань автоматизації ГПА в країнах СНД є АО «Система-Сервіс» (м. Санкт-Петербург) [4]. Як основу для побудови САК ГПА розроблено і виготовляється цілий ряд програмно-апаратних комплексів різного призначення (табл. 1):

- мікропроцесорний субкомплекс контролю і управління МСКУ-СС 4510, призначений для автоматизації технологічних об'єктів, які

виконують завершену функцію основного технологічного процесу, наприклад, ГПА;

- локальна інтелектуальна станція ЛІС 4510, призначена для автоматизації одного або декількох функціонально завершених технологічних вузлів територіально зосередженого технологічного об'єкта;

- пожежний контролер ПК 4510, призначений для використання як блоку керування в системах безпеки (в тому числі і в системах автоматичного пожежогасіння);

- АРМ оператора, призначений для виконання функцій людино-машинного інтерфейсу, ведення архівів та виконання інших функцій, характерних для верхнього рівня систем управління.

Для оновлення систем керування ГПА із застарілою автоматикою (наприклад, А705-15) виготовляється контролер на базі апаратних засобів Octagon Systems і спеціальний блок спряження з пристроями зв'язку з об'єктом, що входять до складу системи, яка модернізується.

Головними функціями, які реалізуються САК ГПА, є функції управління, контролю, регулювання, а також деякі інформаційні функції. Крім традиційних функцій САК ГПА реалізує додаткові функції управління на агрегатному рівні, зокрема автоматизоване зняття помпажних характеристик, антипомпажне регулювання і антипомпажний захист, підтримка заданої витрати нагнітача або тиску на його виході, обмеження тиску на виході ГПА, визначення експлуатаційних характеристик нагнітача і агрегата загалом, згідно з якими робиться висновок про необхідність оновлення помпажних характеристик або проведення профілактичних робіт на двигуні або нагнітачі. До структури ГПА входять пристрій керування, який містить контролер і модулі 7BP16-1 (Analog Devices), пристрій регулювання, який містить контролер, підсилювач-формувавч, та 7BP16-1 – панель з модулями 7B, МРВ-8/24 – панель з модулями 70G, а також пристрої зв'язку з об'єктом, до складу яких входять контролери, плати вихідних підсилювачів ВВУ-12 та панелі з модулями МРВ-24. Як контролери використані вироби фірми Octagon Systems, що мають повну ІВМ РС сумісність, низьке енергоспоживання, високу працездатність в жорстких умовах експлуатації, компактні. Проте, цим контролерам САК ГПА властиві деякі недоліки: незадовільні метрологічні характеристики аналогового 16-канального комутатора МІХ-16; відсутнє діагностування обривів ланцюгів давачів; відсутні тестові програми для модулів вводу/виводу; утиліта Smart Link, призначена для завантаження програм в контролер і їх запуску, обмежена за своїми функціями і має незручний інтерфейс користувача.

Для передачі інформації між пристроями в системі управління використовуються дві мережі: промислова мережа класу Fieldbus (з протоколом Modbus) і звичайна мережа Ethernet. По класу Fieldbus передається лише керувальна інформація. Він забезпечує потрібну надійність доставки інформації. Ось проблеми, пов'язані з

використанням Ethernet: мережа Ethernet не забезпечує гарантовану доставку інформації та не може використовуватись в системах реального часу, оскільки метод арбітражу системної магістралі, використаний у ній, не забезпечує обмеження максимального часу затримки.

До складу САК ГПА входять канали різного типу. Вимірювальні канали САК забезпечують вимірювання технологічних параметрів і порівняння із заданими значеннями попереджувальних, або аварійних уставок. Каналами керування передаються команди на керування виконавчими механізмами. Усі сигнали системи можна поділити на вхідні і вихідні, аналогові і дискретні. САК приймає як аналогові, так і дискретні вхідні сигнали, тобто сигнали від давачів типу «сухий» контакт. Джерелами вхідних аналогових сигналів є давачі температури, тиску, перепаду тиску, віброшвидкості, вібропереміщення, рівня, осьового зсуву, частоти обертання та ін. Джерелами вхідних дискретних сигналів є кінцеві вимикачі та інші сигналізатори стану технологічного обладнання, а також клавіші і кнопки пультів керування.

Вихідні дискретні сигнали забезпечують видачу сигналів керування на пускачі виконавчих механізмів, обмотки соленоїдів кранів та інше технологічне обладнання об'єкта. Вихідні аналогові сигнали потрібні для виконання задач регулювання – паливного, антипомпажного, положення повітря-направляючого апарату, положення жалюзі утилізатора тепла та ін. Канали вимірювання та аналогового керування реалізовані такими технологічними засобами, як давачі, бар'єри іскробезпеки, вторинні аналогові перетворювачі серії 7B (Analog Devices), блок комутаторів і контролери серії 5000 (Octagon Systems). Канали прийому і видачі дискретних сигналів в САК ГПА використовують вторинні перетворювачі сигналів фірми Grayhile. Сигнали з вхідних перетворювачів надходять на вхід модулів дискретного вводу контролерів пристрою зв'язку з об'єктом і пересилаються в контролер пристрою управління, де здійснюється обробка даних і формується масив вихідної інформації. В пристрої управління на базі цього масиву формуються команди управління, які пересилаються в контролер пристрою зв'язку з об'єктом, який, в свою чергу, керує вихідними перетворювачами і під'єднаними до них виконавчими механізмами.

Проте швидкодія каналів регулювання САК ГПА є неефективною, тому на КС трапляються аварії, викликані явищем помпажу в компресорах.

**Постановка завдання.** Метою даної роботи є структурно-параметрична оптимізація підсистеми дискретного антипомпажного керування ВН ГПА ДКС ПСГ. Вирішення цієї задачі дасть змогу захистити компресор від помпажу, підвищити надійність роботи ДКС ПСГ та знизити витрати на відновлення ВН та двигуна.

**Результати.** Функцію передачі відцентрового нагнітача досліджуваного ГПА визначили

Таблиця 2 – Дані для побудови перехідної характеристики досліджуваного об'єкта

<i>t, c</i>	0	1	2	3	4	5	6	7	8
<i>x(t)</i>	1	1	1	1	1	1	1	1	1
<i>y(t)</i>	0	0,20	0,25	0,42	0,53	0,65	0,75	0,81	0,87

Продовження таблиці 2

<i>t, c</i>	9	10	11	12	13	14	15	16
<i>x(t)</i>	1	1	1	1	1	1	1	1
<i>y(t)</i>	0,9	0,92	0,96	0,98	0,99	1	1	1

шляхом обробки експериментальних даних, одержаних на ГПА №9 ДКС ПСГ «Більче-Волиця». На вході ГПА була різко збільшена подача газу у відцентровий нагнітач. Внаслідок такого збурення режиму по каналу  $P \rightarrow Q$  об'ємна продуктивність ВН зросла, і були записані графіки перехідної характеристики об'єкта  $Q(t)$  і збурення  $P(t)$ .

Оскільки зміни вхідної і вихідної величин об'єкта були зафіксовані в розмірній формі, перейшли до безрозмірних одиниць за формулами:

$$x(t) = \frac{P(t) - P_0}{P_\infty - P_0},$$

$$y(t) = \frac{Q(t) - Q_0}{Q_\infty - Q_0},$$

де:  $P_0, Q_0$  – початкові значення тиску і об'ємної продуктивності,

$P_\infty, Q_\infty$  – максимальні усталені значення тиску і об'ємної продуктивності.

Розрахунки для побудови перехідної характеристики виконали в математичному редакторі Mathcad. Крок дискретизації становить 1с.

Отримані результати зводимо до таблиці 2.

Проводимо апроксимацію перехідної характеристики  $y(t)$  методом площ, який базується на гіпотезі, що досліджуваний об'єкт може бути описаний лінійним диференціальним рівнянням з постійними коефіцієнтами. Для цього вибрали степінь поліному знаменника моделі функції передачі об'єкта  $N=2$ , а степінь поліному чисельника –  $M=0$ , оскільки керована величина в початковий момент дорівнює нулю  $y(t)=0$ , а перша похідна в початковий момент не дорівнює нулю  $y'(t) \neq 0$ . Крок дискретизації  $T = 1$  с., вхідне збурення  $x_0=1,0$ , кількість дискрет перехідної характеристики  $NK = 16$ .

Результати апроксимації наведено на рис. 1 і рис. 2.

Отже, отримано функцію передачі ВН:

$$W(\delta) = \frac{1}{4,782\delta^2 + 4,38\delta + 1}. \quad (1)$$

Максимальна похибка апроксимації в даному випадку становить 2,3%, що є достатнім для вирішення задач автоматизації процесу керування.

Враховуючи, що функція передачі

$$W(\delta) = \frac{y(p)}{x(p)},$$

де:  $x(p)$  – зображення за Лапласом відносного значення вхідної величини об'єкта;

$y(p)$  – зображення за Лапласом відносного значення вихідної величини, можна від функції передачі перейти до операторного запису диференційного рівняння

$$(4,782\delta^2 + 4,38\delta + 1)y(p) = x(p), \quad (2)$$

або

$$\left(T_{01}^2\delta^2 + T_{02}\delta + 1\right)y(p) = x(p), \quad (3)$$

де  $T_{01}^2 = 4,782 \text{ c}^2$ ;  $T_{02} = 4,38 \text{ c}$ .

Із рівняння (2) отримали диференціальне рівняння, яке описує поведінку досліджуваного об'єкта:

$$4,782 \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + 4,38 \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = x(t). \quad (4)$$

Оскільки коефіцієнт затухання

$$\xi = \frac{T_{02}}{2T_{01}} = \frac{4,38}{2\sqrt{4,782}} = 1,004 > 1,$$

то характеристичне рівняння, яке відповідає диференційному рівнянню (4), має не комплексні, а від'ємні дійсні корені [5]. Тому ліва половина рівняння (3) може бути розкладена на два співмножники, а рівняння подаватися у вигляді:

$$(\hat{O}_1\delta + 1)(\hat{O}_2\delta + 1)y(p) = x(p), \quad (5)$$

де:  $T_{1,2} = \frac{T_{02} \pm \sqrt{T_{02}^2 - 4T_{01}^2}}{2}$ ,

$$T_{02}^2 = T_1 T_2; T_{02} = T_1 + T_2.$$

Тоді функцію передачі досліджуваного об'єкта можна подати у такому вигляді:

$$W_{\hat{e}i}(\delta) = \frac{1}{(\hat{O}_1\delta + 1)(\hat{O}_2\delta + 1)}, \quad (6)$$

де  $T_1 = 2,309$ ;  $T_2 = 2,07$  – сталі часу.

Щоб отримати функцію передачі (6) у розмірному вигляді, її необхідно домножити на співвідношення

$$\frac{\Delta Q}{\Delta P} = -\frac{49}{0,08} = -612,5 \frac{\dot{\text{і}}^3/\delta\hat{a}}{\ddot{\text{і}}\hat{a}} = -10,2 \frac{\dot{\text{і}}^3/\ddot{\text{і}}}{\ddot{\text{і}}\hat{a}},$$

тоді

$$W(\delta) = \frac{-10,2}{4,782\delta^2 + 4,38\delta + 1} \frac{\dot{\text{і}}^3/\ddot{\text{і}}}{\ddot{\text{і}}\hat{a}},$$

де  $\Delta P = 0,08 \text{ МПа}$  – приріст тиску газу.

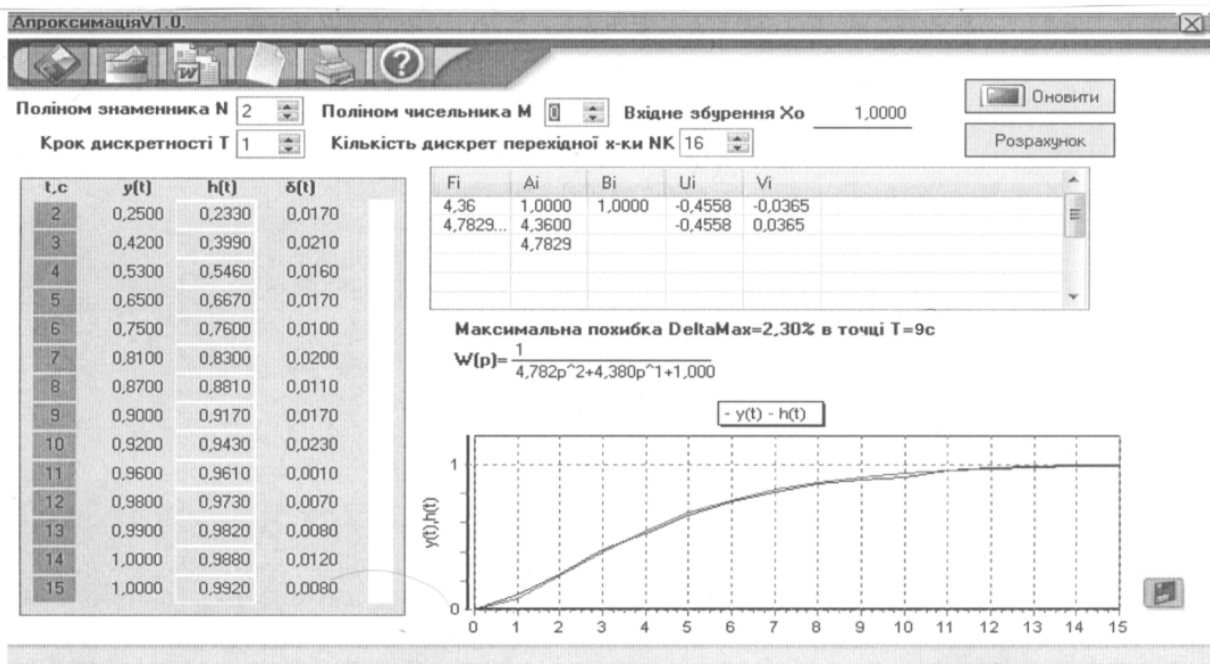
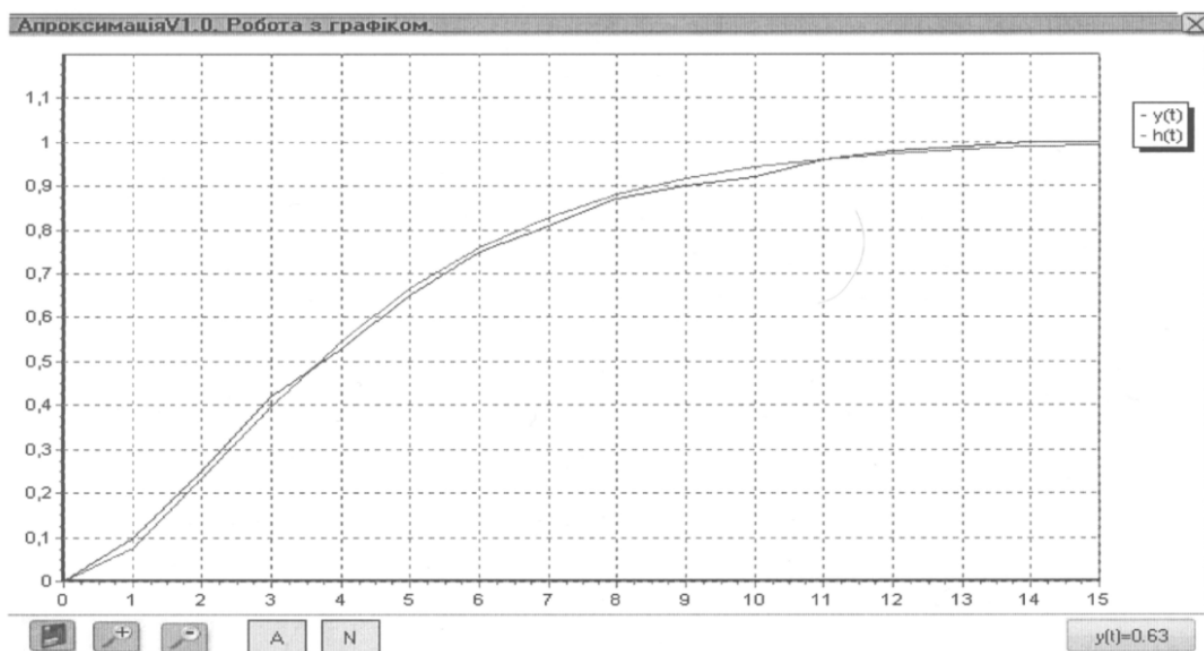


Рисунок 1 – Результати апроксимації перехідної характеристики ВН



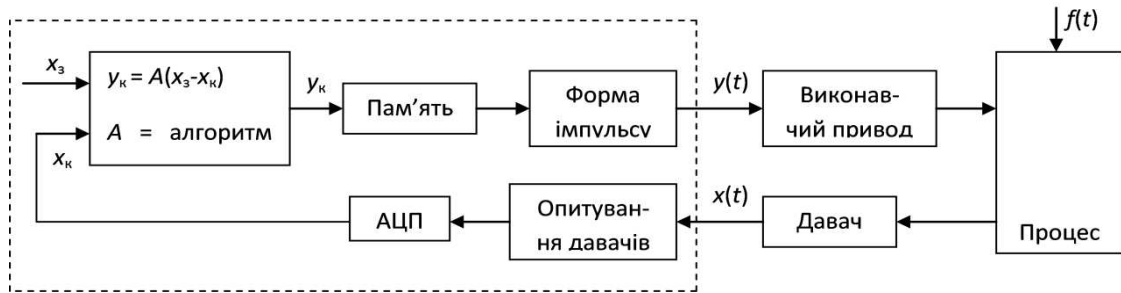
характеристики:  $y(t)$  – експериментальна;  $h(t)$  – теоретична

Рисунок 2 – Перехідна характеристика ВН

Відомо [6÷9], 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 у разі збереження необхідних показників якості системи.

Одним із методів підвищення швидкодії та динамічної точності автоматичних систем регулювання є удосконалення алгоритму регулювання. Аналіз літературних джерел [6÷9 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



$f(t)$  – збурюючий вплив;  $x_z$  – задане значення керованої величини;  
 $x_k$  – контрольоване значення керованої величини;  $y(t)$  – керувальний вплив

Рисунок 3 – Підсистема дискретного антипомпажного регулювання ДКС ПСГ

порівняно з ПІ-регулятором на один, або навіть два порядки [6÷9]. 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 вінерівського алгоритму і є неробастним. При великому запізненні переваги переходу від ПІ-алгоритму керування до ПІД-алгоритму суттєво зменшуються [11].

Враховуючи, що відцентровий нагнітач 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, графоаналітичних, аналітичних, наближених методів визначення параметрів налаштування ідеального ПІД-регулятора [6]. Проте, не залежно 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 належна увага проблемі робастності автоматичної системи регулювання з ПІД-алгоритмом і особливостям, що пов'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 клапана. Ця проблема вимагає проведення аналізу і корекції багатьох положень, які склалися в процесі розробки методів синтезу неперервних систем автоматичного керування [5]. Сказане стосується і дискретно-неперервної системи антипомпажного керування відцентровим нагнітачем дотискувальної компресорної станції (ДКС) підземного

сховища газу (ПСГ), в якій дискретність обумовлена дискретним характером інформації від давача керованої величини та дискретним характером керувальних впливів від регулятора.

Розглянемо аналітичний метод визначення оптимальних параметрів налаштування регулятора з дискретним ПІД-алгоритмом без обмежень на структуру і параметри функції передачі керованого об'єкта. Функціональна структура підсистеми – одноконтурна (рис.3).

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

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

не має коренів, для яких кореневий показник

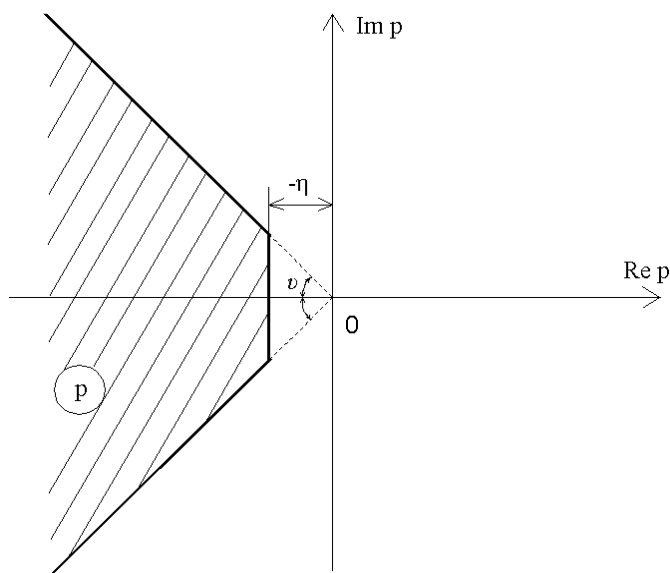
коливальності  $\mu_k = \frac{|\beta_k|}{|\alpha_k|}$  перевищує задане значення  $\mu$  [6÷9].

На площині коренів (рис. 4) ступеню коливальності системи  $\mu$  відповідає сектор між двома симетричними променями, які утворюють з дійсною віссю кут

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

. 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  $\mu \leq 2,72 \div 1,57$ .

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



$\eta$  – запас стійкості;  $v$  – ступінь (запас) коливальності  $\text{Im } p / \text{Re } p \leq v$

Рисунок 4 – Область бажаного розташування коренів характеристичного полінома замкненої системи антипомпажного регулювання

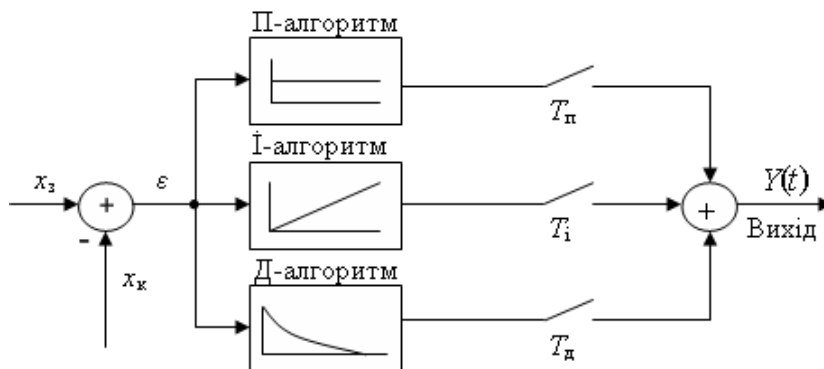


Рисунок 5 – Структура дискретного ПІД-регулятора

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 різницею  $\Delta\beta = \beta_1$ . Для рівняння третього порядку оптимальне співвідношення  $\Delta\beta / \eta$  дорівнює 1,45.

Завдання оптимального параметричного синтезу такої системи зводиться до визначення параметрів налаштування ПІД-регулятора.

На рис. 5 наведено паралельну структуру ПІД-регулятора – спеціальний вид математичної обробки сигналу в регуляторі, при якій П-, І- та Д-компоненти працюють паралельно й незалежно, і лише після обробки результату об'єднуються.

Алгоритм керування для дискретного регулятора, який реалізується програмним методом, можна одержати із ідеального ПІД-алгоритму [5]

$$y(t) = K_{\text{I}} \varepsilon(t) + K_2 \int_0^t \varepsilon(t) dt + K_{\text{D}} \frac{d\varepsilon(t)}{dt},$$

де:  $y(t)$  – керувальний вплив;

$K_{\text{П}}, K_{\text{I}}, K_{\text{D}}$  – коефіцієнти передачі пропорційної, інтегральної та диференційної складових алгоритму керування (параметри налаштування);

$\varepsilon(t)$  – сигнал розузгодження системи.

Тоді дискретний ПІД-алгоритм регулювання матиме такий вигляд [8]:

$$W_{\text{ПІД}}(z) = K_{\text{I}} + \hat{E}_z \frac{z}{z-1} + \hat{E}_{\text{D}} \frac{z}{z-1} (1-z^{-1}),$$

де:  $T$  – крок дискретизації;  
 $z = e^{pT}$ .

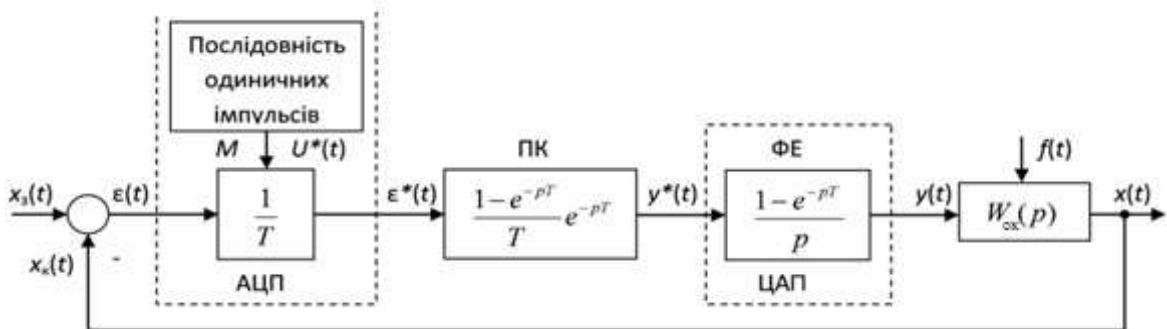
Обмежимося виведенням формул розрахунків для одномірної автоматичної системи антипомпажного регулювання з типовим дискретним алгоритмом керування (рис. 6).

Як видно з рис. 6, дана автоматична система регулювання є одноконтурною системою з від'ємним зворотним зв'язком, до лінійної частини якої входять ряд елементів з власними функціями передачі (табл. 3).

Функція передачі об'єкта керування вибрана у відповідності з формулою (6), а конфузора і виконавчого механізму – у відповідності з рекомендаціями, викладеними в [12].

Таблиця 3 – Функції передачі елементів лінійної частини системи автоматичного антипомпажного регулювання

Найменування складового елемента	Загальний вигляд функції передачі	Функція передачі з числовими значеннями
Конфузор	$W_{\hat{i}\hat{a}}(\delta) = \hat{E}_1$	$W_{\hat{a}\hat{i}}(\delta) = 0,25$
Виконавчий механізм	$W_{\hat{a}\hat{i}}(\delta) = \frac{1}{\hat{O}_3 \delta + 1}$	$W_{\hat{a}\hat{i}}(\delta) = \frac{1}{4,0 \delta + 1}$
Об'єкт керування	$W_{\hat{a}\hat{i}}(\delta) = \frac{\hat{E}_1}{(\hat{O}_1 \delta + 1)(\hat{O}_2 \delta + 1)}$	$W_{\hat{a}\hat{i}}(\delta) = \frac{-10,2}{(2,309 \delta + 1)(2,07 \delta + 1)}$



ФЕ – формуючий елемент; ПК – програмований контролер; М – модулятор;  $f(t)$  – збурюючий вплив;  $W_{ок}(p)$  – еквівалентна функція передачі лінійної частини системи, яка об'єднує функції передачі конфузора  $W_{пе}(p)$ , виконавчого механізму  $W_{вм}(p)$  і об'єкта керування  $W_{ок}(p)$ ;  $x(t)$  – керована величина;  $x_3(t)$  – задане значення;  $x_c(t)$  – контрольоване значення керованої величини

Рисунок 6 – Блок-схема дискретної системи антипомпажного регулювання з програмованим контролером

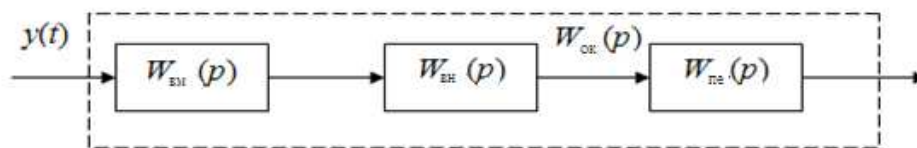


Рисунок 7 – Алгоритмічна структура лінійної частини системи

Алгоритмічна структура лінійної частини системи автоматичного антипомпажного регулювання наведена на рис. 7.

Еквівалентна функція передачі має вигляд

$$W_{ок}(p) = W_{пе}(p)W_{вм}(p)W_{вн}(p). \quad (7)$$

З урахуванням даних таблиці 3.5 цей вираз набуде такого вигляду:

$$W_{\hat{i}\hat{e}}(\delta) = \hat{E}_1 \cdot \frac{1}{(\hat{O}_3 \delta + 1)} \cdot \left( \frac{-\hat{E}_1}{(\hat{O}_1 \delta + 1)(\hat{O}_2 \delta + 1)} \right),$$

або

$$W_{\hat{i}\hat{e}}(\delta) = \frac{-2,55}{(4,0 \delta + 1)(2,309 \delta + 1)(2,07 \delta + 1)}. \quad (8)$$

Таким чином, система автоматичного регулювання (без регулятора) описується функцією передачі третього порядку. Для визначення параметрів налагодження регулятора скористаємося методом незгасаючих коливань – методом Ціглера-Нікольса.

Метод Ціглера-Нікольса є спрощеним методом розрахунку регуляторів за однією точкою АФХ об'єкта керування, який широко ви-

користується у світовій практиці. У відповідності до цього методу розрахунок параметрів налаштування регуляторів проходить у 2 етапи:

1. Розраховують критичний параметр налаштування пропорційної частини  $S_1^{\hat{e}p}$  ( $S_0 = S_2 = 0$ ), при якому АСР перебуватиме на межі стійкості, і відповідну цьому параметру критичну частоту  $\omega_{кр}$ .

2. Визначають за  $S_1^{\hat{e}p}$  і  $\omega_{кр}$  параметри налаштування регулятора  $S_1^{\hat{i}\hat{o}}$ ,  $S_2^{\hat{i}\hat{o}}$ ,  $S_0^{\hat{i}\hat{o}}$ , які забезпечують ступінь затухання  $\psi = 0,8 \div 0,9$ .

Рівняння для розрахунку  $S_1^{\hat{e}p}$  і відповідної йому частоти  $\omega_{кр}$  отримують при  $m = 0$ :

$$\varphi_0(\omega) + \pi = 0, \quad (9)$$

де  $\varphi_0(\omega)$  – ФЧХ об'єкта керування.

З цього рівняння визначимо  $\omega_{кр}$ . Критичний параметр налаштування пропорційної частини  $S_1^{\hat{e}p}$  визначають таким чином:



$$S_1^{\hat{e}p} = \frac{1}{A_0(\omega_{\hat{e}\delta})}, \quad (10)$$

де  $A_0(\omega_{\text{кр}})$  – значення АЧХ об'єкта керування на критичній частоті  $\omega_{\text{кр}}$ .

Параметри налаштування визначили за наступними формулами:

для ПД-регулятора:

$$S_1^{\hat{i}i\delta} = 0,6 S_1^{\hat{e}\delta}, \quad S_2^{\hat{i}i\delta} = 0,192 S_1^{\hat{e}\delta} \omega_{\hat{e}\delta},$$

$$S_2^{\hat{i}i\delta} = \frac{0,471 S_1^{\hat{e}\delta}}{\omega_{\hat{e}\delta}} \quad (11)$$

в математичному редакторі Mathcad.

В результаті отримали такі значення параметрів налаштування  $S_1^{\hat{i}i\delta} = 4,383\%$  ходу рег.орг./ кгс/см<sup>2</sup>,  $S_2^{\hat{i}i\delta} = 0,927$  с,  $S_0^{\hat{i}i\delta} = 5,205$  с.

Якщо зменшити крок дискретизації, то при  $T \rightarrow 0$  повинні виконуватись умови еквівалентності Ципкіна Я.З. для імпульсних і неперервних систем:

$$\omega_d \ll 2 \omega_{\text{нп}},$$

$$\omega_x \gg \omega_d - \omega_{\text{нп}}, \quad (12)$$

де:  $\omega_d$  – частота дискретизації;

$\omega_{\text{нп}}$  – 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.

Промисловий взірць підсистеми розроблений у комплексі системи автоматизованого керування газоперекачувальним агрегатом САК ГПА Ц-16 на базі контролерів фірми “Сіменс” і швидкодіючого антипомпажного клапана фірми “Моквелд”, який при виникненні помпажних явищ забезпечує розвантаження ГПА методом рециркуляції газу “з виходу на вхід” нагнітача. У випадку виведення агрегата з режиму помпажу передбачена аварійна зупинка ГПА. Для випробувань системи методом варіативного прикриття, а також повного закриття загальностанційних кранів 6-2 (Ду700 мм), 6-2М (Ду300 мм) і 6-2Р (Ду150 мм), що забезпечують отримання помпажних явищ в контурі нагнітача №9. Система реалізує спосіб визначення настання помпажних явищ в нагнітачі відцентрового типу на ГПА газотурбінного типу шляхом зняття і аналізу динамічної зміни в групі параметрів, що характеризують роботу нагнітача та газотурбінного привода, який характеризується відсутністю прив'язки до абсолютних показників та значень кожного з параметрів. Сукупність виявлення динамічних відхилень і взаємозв'язків в характеристиках, що визначають роботу відцентрового нагнітача та його газотурбінного привода, і безперервний моніторинг

поточного стану показників відносно відомого стану параметрів в процесі стаціонарності експлуатації, дають змогу з максимальною реакцією в часі (до 0,01 с) визначити момент настання помпажних явищ в нагнітачі і здійснювати виведення компресора зі стану помпажу шляхом формування сигналу на антипомпажний регулятор та інші засоби керування агрегатом.

**Висновок.** Вперше визначено структурну схему, здійснено структурно-параметричну оптимізацію системи автоматичного антипомпажного регулювання відцентрового нагнітача газоперекачувального агрегату дотискувальної компресорної станції підземного сховища газу, яка реалізує метод визначення настання помпажних явищ в нагнітачі відцентрового типу на газоперекачувальному агрегаті з газотурбінним приводом в реальному часі шляхом контролю і аналізу динамічної зміни в групі параметрів, що характеризують роботу нагнітача та газотурбінного привода. Це дало змогу зменшити час визначення моменту настання помпажних явищ в нагнітачі до 0,01 секунди і здійснювати виведення компресора зі стану помпажу шляхом формування сигналу на антипомпажний регулятор та інші засоби керування газоперекачувальним агрегатом.

### Література

- 1 Герасименко В.П. Вращающийся срыв в турбинном режиме работы компрессора / В.П.Герасименко, М.В.Бойко, А.А.Гарагуль, Н.Б.Налесный // Энергетические и технологические процессы и оборудование. – 2005. – №6. – С.65-71.
- 2 Пат. 5427, Україна, МКУ F04D27/02. Спосіб захисту компресора газоперекачувального агрегату від помпажу / Соляник В.Г., Колодяжний В.В., Слесар П.Ф., Чепурний О.П., Хохряков М.В., Дістрянов С.В., Даценко А.І. Заявитель и патентообладатель ДК «Укртрансгаз». – № 00042504084; заявл.28.05.2004; опубл.15.03.2005, Бюл.№3.
- 3 Пат. 2640, Україна, МПК 7F04D27/02, Пристрій для захисту від помпажу компресора / Бандура І.М., Колеснікова О.В., Крайнюк О.А., Заявник і патентовласник Нац.аерокосм.ун-т ім. М.С.Жуковського «Харківський авіаційний інститут». – №20003054915; заявл. 29.05.2003; опубл.15.07.2004, Бюл.№7.
- 4 Прошовиков С. Опыт автоматизации сложных промышленных объектов на примере газокomppressorных станций / С. Прошовиков, А.Макаров, В.Бунин, А.Черников // Системная интеграция. Нефтегазовая промышленность. – 1999. – №2. – С.16-25.
- 5 Лукас В.А. Теория автоматического управления / Вильмар Адольфович Лукас. – М.: Недра, 1990. – 416 с.
- 6 Панько М.А. К расчету оптимальных настроек ПИД-регуляторов / М.А.Панько, А.В.Иванов // Теория и практика построения и функционирования АСУТП. – М.: Изд. МЭИ, 1998. – С.35-43.

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

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

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

10 Волгин В.В. Расчет настроек автоматических систем регулирования / В.В.Волгин. – М.: Изд. МЭИ, 1975. – 127 с.

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

12 Пат. 89302 Україна. Спосіб захисту компресора від помпажу / Беккер М.В., Шимко Р.Я., Семенов Г.Н., Бляут Ю.С., Гіренко С.Г., Петеш М.О., Сукач О.В., Репета А.Ф. – № а2008 07810; заявл. 09.06.2008; опубл. 25.11.2009, Бюл. №22 . – 10 с.

*Стаття надійшла до редакційної колегії*

*04.11.11*

*Рекомендована до друку професором*

*М. І. Горбійчуком*