

## ВИКОРИСТАННЯ БАГАТОПАРАМЕТРИЧНОГО РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ СКЛАДНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ

А.І. Лагойда

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 727167,  
e-mail: And\_ij@mail.ru

*Проведено аналіз функції передачі відцентрового нагнітача газоперекачувального агрегату (ВН ГПА). Наведено методику визначення параметрів налаштування ПІД- та ПІДД2-регулятора через параметри функції передачі об'єкта. На основі обчислених значень у програмному продукті Matlab проведено моделювання технологічного процесу з ПІД-, ПІДД2-, ПІДД2Д3-, ПДД2-, ПДПД-регуляторами та визначено їх оптимальні параметри налаштування, що забезпечить максимальну швидкодію системи антипомпажного регулювання.*

Ключові слова: відцентровий нагнітач, регулятор, налаштування, функція передачі, швидкодія.

*Проведен анализ передаточной функции центробежного нагнетателя газоперекачивающего агрегата (ЦН ГПА). Приведена методика определения параметров настройки ПИД- и ПИДД2-регулятора по параметрам передаточной функции объекта. По рассчитанным значениям в программном продукте Matlab проведено моделирование технологического процесса с ПИД-, ПИДД2-, ПИДД2Д3-, ПДД2-, ПДПД-регуляторами и определены их оптимальные параметры настройки, что обеспечит максимальное быстродействие системы антипомпажного регулирования.*

Ключевые слова: центробежный нагнетатель, регулятор, настройка, функция передачи, быстродействие.

*The transfer function of the centrifugal blower in a gas compressor unit was analyzed. The technique of determination of the settings for PID controller and PIDD2- parameters regulator of the object transfer function was offered. On the basis of the calculated values, the Matlab software product was used to simulate the technical process of PID-, PIDD2-, PIDD2D3-, PDD2-, PDPD-regulators and their optimal settings were determined, that will provide the best response rate of antisurge regulation system.*

Key words: centrifugal blower, regulator, setting, transfer function, response rate.

**Вступ.** На дотискувальних компресорних станціях ДК «Укртрансгаз», особливо тих, що працюють на підземних сховищах газу, актуальною є проблема захисту газоперекачувальних агрегатів від помпажу. Щоб уникнути даного явища необхідно удосконалити існуючі методи та розробити нові підходи до антипомпажного регулювання газоперекачувального агрегату. Проте, аналіз літературних джерел [1,6] вказує на недостатній об'єм досліджень в напрямку підвищення швидкодії САК ГПА. Тому метою даної роботи є розроблення багатопараметричного регулятора для складних технологічних об'єктів, якими є системи автоматичного антипомпажного регулювання ГПА.

Основними задачами експлуатації ГПА з газотурбінним приводом є забезпечення надійної безаварійної роботи відцентрових нагнітачів (ВН) із максимально високою економічністю і підтримання компримування газу точно за заданим графіком. Для успішного виконання даних задач необхідно під час експлуатації нагнітачів постійно підтримувати їхні динамічні властивості в заданих межах. Витрата природного газу через ВН є головним і досить важливим показником надійності і економічності роботи ГПА в цілому і визначається на компресорній станції за перепадом тиску на конфузори всмоктуючого патрубку ВН. Ступінь підвищення тиску газу ВН також є дуже важливим показником його роботи. Чим він вищий, тим

витрати на перекачування газу менші. Однак для ВН тиск має свої межі, зазначені в наведених характеристиках, перевищувати які не можна. Під час роботи ВН за малих об'ємних витрат (нижче 130 м<sup>3</sup>/хв) і значних підвищеннях тиску (вище 1,5) може настати явище помпажу.

Неконтрольована зміна хоча б одного показника роботи нагнітача із вище зазначених призводить до порушення газодинамічної характеристики ВН, небажаним результатом чого може стати поломка устаткування. Для запобігання виникненню таких ситуацій необхідно постійно детально досліджувати і аналізувати динамічні властивості ГПА.

Одним із основних методів здійснення такого дослідження є аналітичний. Він полягає у описі динамічних властивостей об'єкта за допомогою алгебраїчних і диференціальних рівнянь.

**Постановка завдання.** Метою даної роботи є розроблення методу, який дасть можливість використовувати багатопараметричний регулятор для складних технологічних об'єктів. Це уможливить автоматичне регулювання і захист відцентрового нагнітача від помпажу, що сприяє підвищенню надійності роботи ГПА. В якості такого об'єкта розглянемо відцентровий нагнітач газоперекачувального агрегату (ВН ГПА) з газотурбінним приводом.

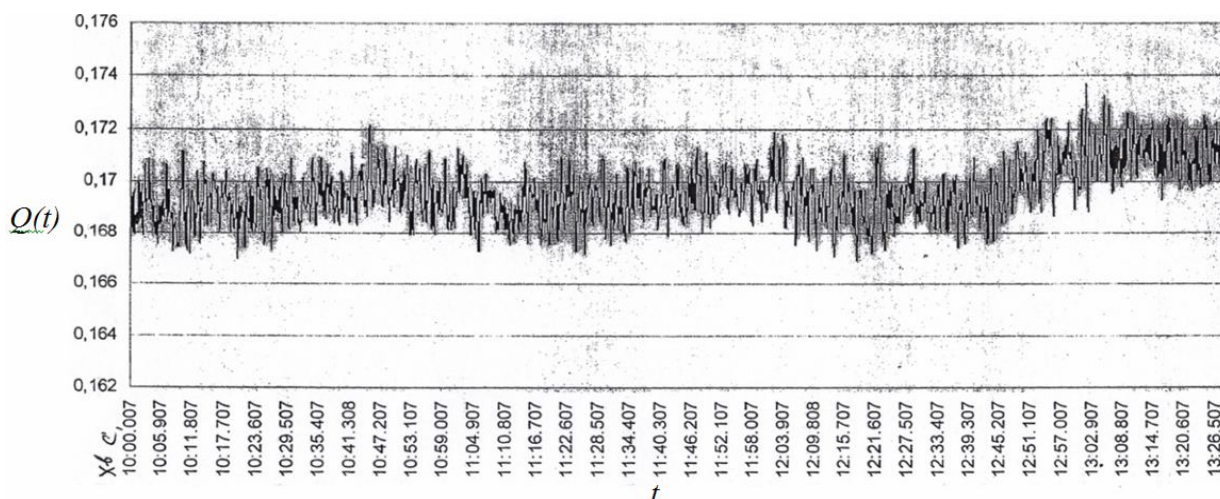


Рисунок 1 – Графік зміни продуктивності  $Q(t)$  відцентрового нагнітача типу Ц-6,3 з газотурбінним приводом

**Результати.** Оскільки зміна параметрів ВН ГПА має випадковий характер, під час побудови моделі застосовували методи математичної статистики. Адже випадкові процеси, як відомо, зручно описувати за допомогою статистичних характеристик, таких як: оцінки математичного сподівання, дисперсії, автокореляційної функції та спектральної густини.

Отже, для застосування вище вказаних статистичних характеристик у ході моделювання помпажних характеристик ВН необхідно провести аналіз динамічних властивостей нагнітача на основі методів математичної статистики.

Вихідними даними для проведення аналізу статичних характеристик є графік зміни перепаду тиску на конфузори, зображений на рис. 1.

Для зручності цифрового оброблення даного графіку здійснимо переведення часу із хвилин в секунди. Отже, початковий час дорівнюватиме  $10:00.007 \text{ хв} = 600,007 \text{ с}$ , відповідно, кінцевий час буде представлений як  $13:26.507 \text{ хв} = 806,507 \text{ с}$ . Для дослідження вибираємо ділянку, на якій процес є стаціонарним, а саме інтервал від  $10:00.007 \text{ хв}$  ( $600,007 \text{ с}$ ) до  $12:54.107 \text{ хв}$  ( $774,107 \text{ с}$ ).

Наступним кроком є оцифрування графіку з метою отримання таблиці значень сигналу, який позначимо як  $x(t)$ . Для оцифрування графіку використаємо комп'ютерну програму Graph2Digit.

Для того, щоб отримати необхідну і достатню кількість значень  $x$ , потрібно правильно визначити період дискретизації  $\Delta t$  для даного графіку. В програмі Graph2Digit проводимо оцифрування графіку з періодом дискретизації  $0,3 \text{ с}$ . В результаті отримали значення  $x$  та  $t$  у кількості 581. Отримані значення експортуємо в програмний продукт MathCad для подальшого визначення числових характеристик випадкових значень. Значення в програмному продукті MathCad матимуть наступний вигляд:

$$x =$$

	0
0	0.169
1	0.1696
2	0.168
3	0.1685
4	0.1699
5	0.1687
6	0.1698
7	0.1679
8	0.1691
9	0.1707

$$t =$$

	0
0	600
1	600.3
2	600.6
3	600.9
4	601.2
5	601.5
6	601.8
7	602.1
8	602.4
9	602.7

З метою перевірки отриманих результатів в пакеті MathCad відтворимо неперервний графік залежності  $x(t)$ . Отриманий графік зображено на рис. 2.

Вихідними даними для проведення аналізу вихідного сигналу є графік зміни ступеня підвищення тиску газу  $E(t)$ , зображений на рис. 3.

Всі операції, що проводились із вхідним сигналом  $Q(t)$ , застосуємо і до даного вихідного сигналу  $E(t)$ . Отже, початковий час дорівнюватиме  $10:00.007 \text{ хв} = 600,007 \text{ с}$ , відповідно кінцевий час -  $13:24.847 \text{ хв} = 804,847 \text{ с}$ . Для дослідження вибираємо ділянку, на якій процес є стаціонарним, а саме, інтервал від  $10:00.007 \text{ хв}$  ( $600,007 \text{ с}$ ) до  $12:54.107 \text{ хв}$  ( $774,107 \text{ с}$ ).

Оцифрування графіка  $E(t)$  здійснюємо з періодом дискретизації  $0,3 \text{ с}$ . В результаті отримуємо 581 значення  $y$  та  $t$ , які наведені нижче:

$$y =$$

	0
0	1.4003
1	1.3994
2	1.4007
3	1.4001
4	1.3992
5	1.3998
6	1.4002
7	1.3994
8	1.3999
9	1.4

$$t =$$

	0
0	600
1	600.3
2	600.6
3	600.9
4	601.2
5	601.5
6	601.8
7	602.1
8	602.4
9	602.7

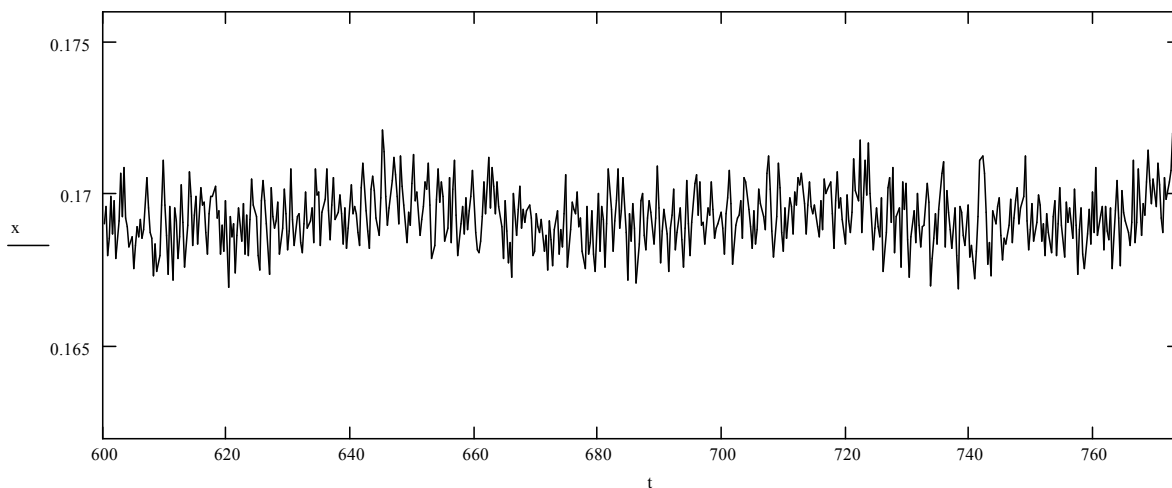


Рисунок 2 – Відтворений графік зміни продуктивності  $Q(t) = x(t)$  відцентрового нагнітача

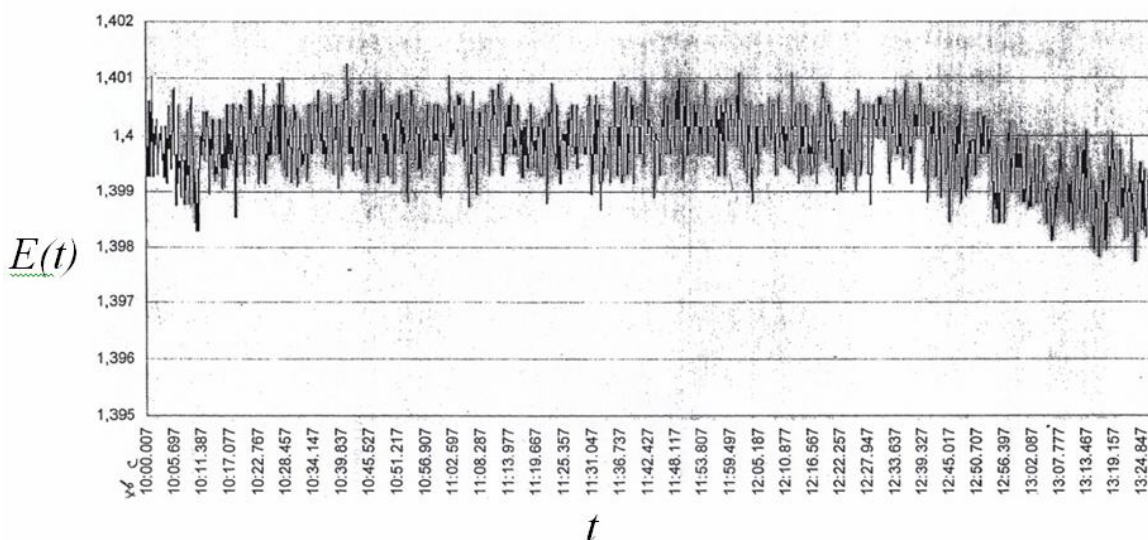


Рисунок 3 – Графік зміни ступеня підвищення тиску газу  $E(t)$

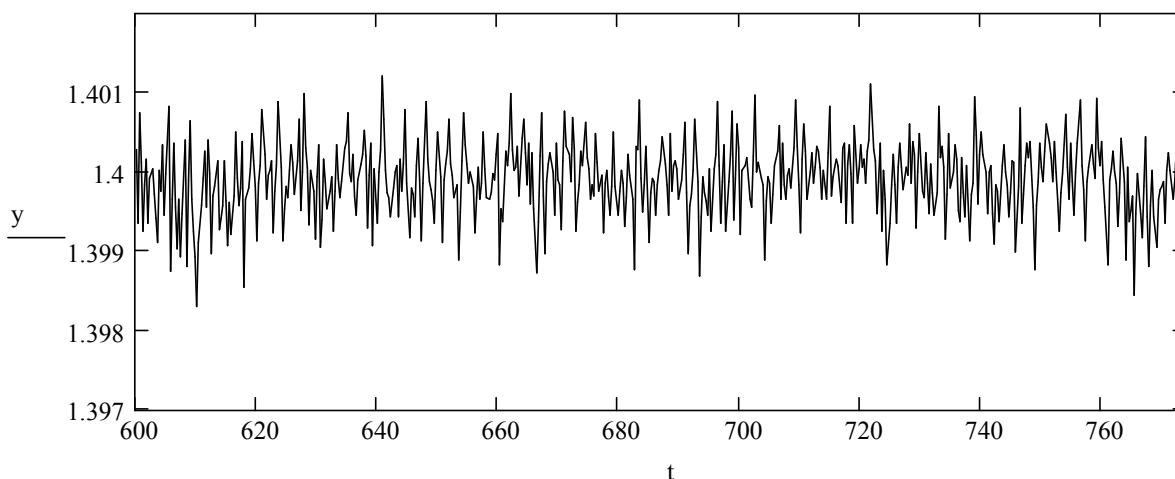


Рисунок 4 – Відтворений графік функції  $E(t) = y(t)$

Користуючись отриманими даними, відтворюємо неперервний графік залежності  $E(t) = y(t)$  в пакеті MathCad (рис. 4).

Провівши дослідження зміни продуктивності відцентрового нагнітача та зміни ступеня підвищення тиску газу на математичне споді-

вання, дисперсію, автокореляційну функцію та спектральну густину, отримуємо наступну функцію передачі ВН ГПА:

$$W(s) = \frac{7,688 \cdot 10^{-4} s + 0,619}{4,099 \cdot 10^{-5} s^2 + 1,526 \cdot 10^{-2} s + 1,358} \quad (1)$$

Таблиця 1 – Визначення параметрів налаштування регулятора через параметри функції передачі об'єкта керування

Параметри налаштування	$W(s) = \frac{K}{(T_1s+1)(T_2s+1)\dots(T_ns+1)} e^{-\tau s}$	
	$n = 2$ ПІД-алгоритм	$n = 3$ ПІДД2-алгоритм
$K_p$	$\frac{T_1 + T_2}{K\tau_2}$	$\frac{T_1 + T_2 + T_3}{K\tau_3}$
$K_i$	$\frac{1}{K\tau_2}$	$\frac{1}{K\tau_3}$
$K_{D1}$	$\frac{T_1T_2}{K\tau_2}$	$\frac{T_1T_2 + T_1T_3 + T_2T_3}{K\tau_3}$
$K_{D2}$	-	$\frac{T_1T_2T_3}{K\tau_3}$

Відомо, що у промислових автоматичних системах регулювання, як правило, рекомендується застосовувати типовий ПІД-регулятор, але коли динамічної точності регулювання з ПІД-регулятором стає недостатньо, зазвичай ускладнюють інформаційну структуру, прикладом чого можуть служити каскадні системи автоматичного регулювання [1, 2].

Оптимальний синтез автоматичної системи регулювання (АСР) прийнято проводити за динамічними характеристиками об'єкта регулювання, представленого, як правило, у вигляді функції передачі  $W(s)$ , отриманих шляхом адекватної апроксимації експериментальних кривих розгону. При цьому структуру  $W(s)$  представляють у вигляді функції передачі  $W_0(s)$  і ланки запізнення [3, 4, 5]:

$$W(s) = W_0(s)e^{-\tau s}, \quad (2)$$

де  $\tau$  – час запізнення.

Першу частину подають у вигляді ланцюжка з « $n$ » послідовно включених аперіодичних ланок зі сталими часу  $T_1, T_2, \dots, T_n$ :

$$W_0(s) = \frac{K}{(T_1s+1)(T_2s+1)\dots(T_ns+1)}, \quad (3)$$

де  $K$  – коефіцієнт передачі.

З урахуванням системного підходу до розв'язання задачі оптимального синтезу автоматичної системи регулювання (АСР) порядок знаменника у формулі (3) визначається, з одного боку, з умови адекватності апроксимуючої функції передачі, з іншого боку, отримана в такий спосіб структура буде визначати функцію передачі оптимального регулятора:

$$W_p(s) = K_p + K_i \frac{1}{s} + K_{D1}s + K_{D2}s^2 + \dots, \quad (4)$$

де  $K_p, K_i, K_{D1}, K_{D2}$  – параметри налаштування регулятора.

Неважко помітити, що для функції  $W_0(s)$  при  $n=2$  оптимальним буде ПІД-алгоритм, при  $n=3$  ПІДД2-алгоритм і т.д. При цьому чи-

сельні значення параметрів налаштування досить легко можуть бути виражені через параметри функції передачі об'єкта (табл. 1) [3, 4, 5].

Користуючись програмним продуктом Matlab, побудуємо перехідну функцію ВН ГПА (рис. 5):

```
>> num=[7.688e-4 0.619];
>> dem=[4.099e-5 0.01526 1.358];
>> W=tf(num,dem)
Transfer function:
      0.0007688 s + 0.619
-----
 4.099e-005 s^2 + 0.01526 s + 1.358
>> step(W)
```

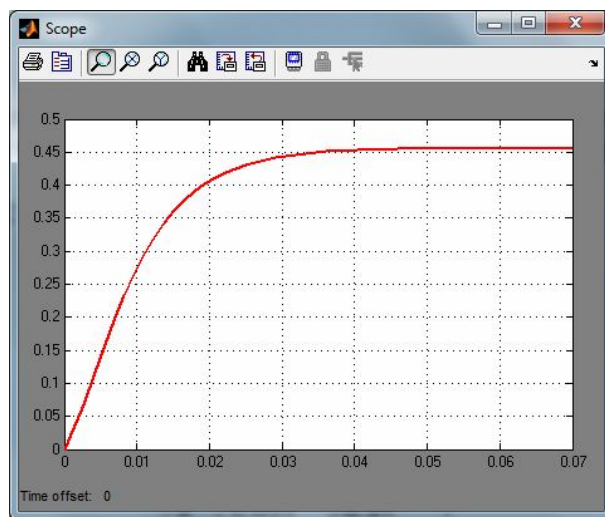


Рисунок 5 – Перехідна функція ВН ГПА як об'єкта керування

Провівши апроксимацію даної перехідної функції і використавши дані таблиці 1, визначимо параметри налаштування ПІД і ПІДД2 регулятора (табл. 2). В результаті побудови перехідної функції з відповідними регуляторами отримано показники якості перехідного процесу (табл. 3).

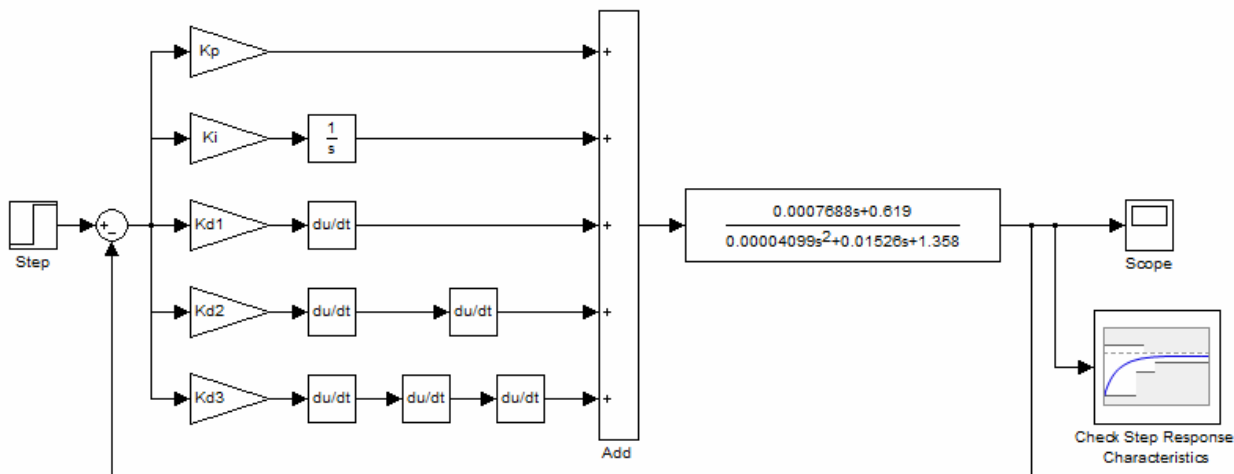


Рисунок 6 – Структурна схема з ПІДІДІДЗ-регулятором в Matlab

Таблиця 2 - Параметри досліджуваних регуляторів

Параметри налаштування	$n = 2$ ПІД-алгоритм	$n = 3$ ПІДІДІДЗ-алгоритм
$K_p$	6,72	6,6632
$K_i$	666,67	666,67
$K_{D1}$	0,0083	0,0097
$K_{D2}$	-	$6,748 \cdot 10^{-10}$

Таблиця 3 - Показники якості перехідних процесів

Тип регулятора	Показники якості перехідного процесу	
	час розгону, с	перерегулювання
ПІД	0,0438	0
ПІДІДІДЗ	0,0423	0

Отримані в такий спосіб регулятори одразу не можуть бути прийняті до практичного застосування, але знання алгоритмів їхнього функціонування дозволить оцінити граничні можливості керування об'єктом і сформулювати відповідні рекомендації.

Для уточнення обчислених значень скористаємося програмним продуктом Matlab, зокрема середовищем Simulink. Було створено регулятори (ПІД, ПІДІДІДЗ), загальну структуру яких наведено на рисунку 7.

Для знаходження оптимальних параметрів налаштування регуляторів було використано елемент блоку оптимізації Signal Constraint - Check Step Response Characteristics, з бібліотеки Simulink. Результати моделювання перехідних процесів з відповідними регуляторами наведені на рисунку 8 та у таблицях 4 та 5.

Як відомо, швидкодія системи буде найбільшою тоді, коли функція передачі регулятора буде оберненою до функції передачі об'єкта. Отже, функція передачі ідеального регулятора матиме вигляд:

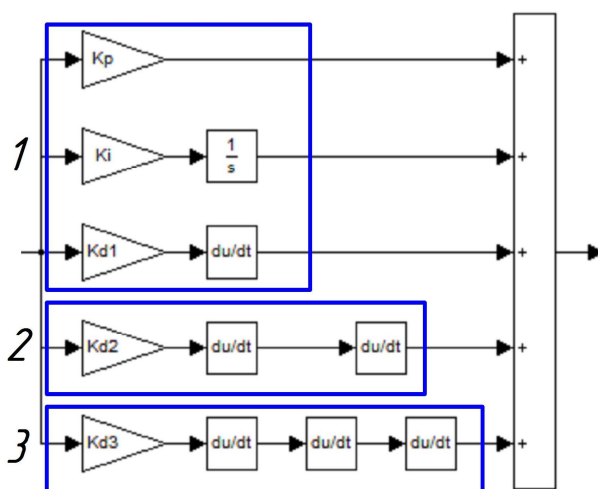


Рисунок 7 – Структура ПІД(1), ПІДІДІДЗ(1+2+3), ПІДІДІДЗ(1+2+3) регуляторів

Таблиця 4 - Параметри налаштування регуляторів після оптимізації

Регулятор	Параметри налаштування		
	$K_p$	$K_i$	$K_{D1}$
ПІД	29.7958	867.4924	0.0579
ПІДІДІДЗ	29.7958	830	0.0579
ПІДІДІДЗ	33.3	950	0.0528

Регулятор	Параметри налаштування	
	$K_{D2}$	$K_{D3}$
ПІД	-	-
ПІДІДІДЗ	$9.7480e-010$	-
ПІДІДІДЗ	$5.9480e-009$	$3.7480e-022$

Таблиця 5 - Показники якості перехідних процесів

Тип регулятора	Показники якості перехідного процесу	
	час розгону, с	перерегулювання
ПІД	0.01125	0%
ПІДІДІДЗ	0.01075	0%
ПІДІДІДЗ	0.0087	0%

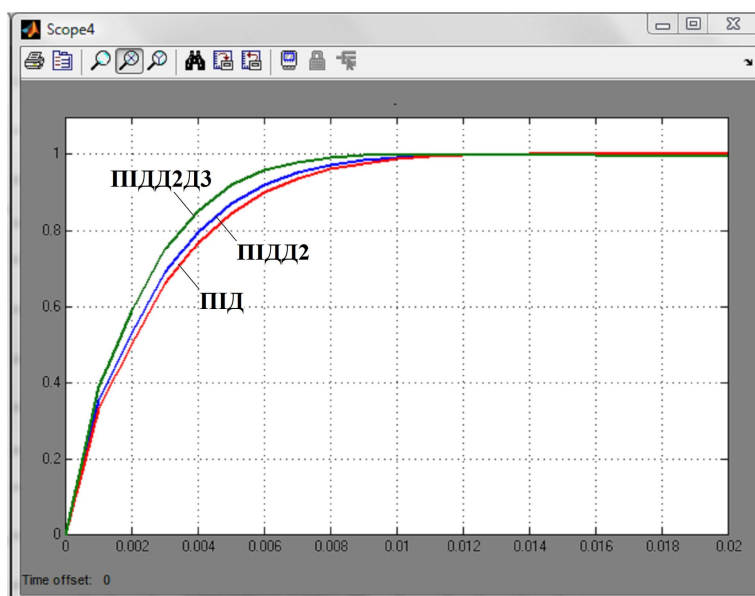


Рисунок 8 – Перехідні функції з ПІД-, ПІД2-, ПІД2Д3-регулятором

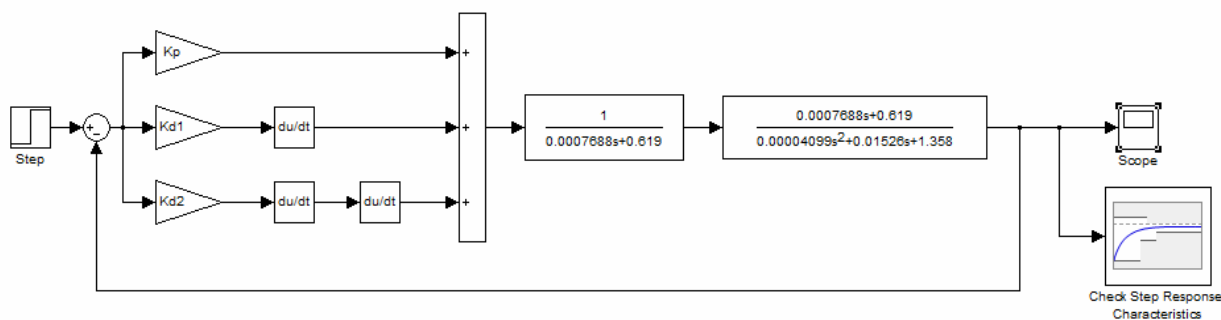


Рисунок 9 – Структурна схема з ПІД2-регулятором в Matlab

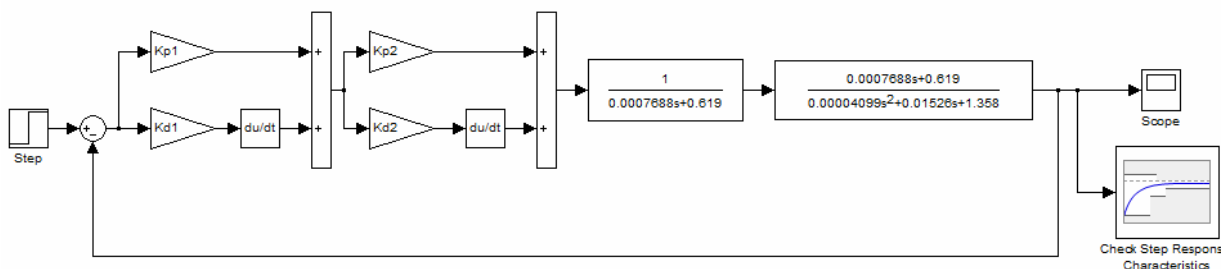


Рисунок 10 – Структурна схема з ПІД2Д-регулятором в Matlab

$$W_p(s) = \frac{4,099 \cdot 10^{-5} s^2 + 1,526 \cdot 10^{-2} s + 1,358}{7,688 \cdot 10^{-4} s + 0,619} \quad (5)$$

На основі передавальної функції 5 розроблено ПІД2-регулятор (рис. 9) та ПІД2Д-регулятор (рис. 10) із двома ПД-регуляторами, сполученими послідовно.

Результати моделювання перехідних процесів з відповідними регуляторами наведені на рисунку 11 та у таблицях 6 та 7.

**Висновки.** В результаті проведених досліджень отримано метод синтезу багатопараметричного регулятора, який значно підвищив швидкість досліджуваної системи за рахунок зміни структури регулятора.

Таблиця 6 - Параметри налаштування регуляторів після оптимізації

Регулятор	Параметри налаштування	
	$K_{p1}$	$K_{p2}$
ПІД2	1.0324e+003	-
ПІД2Д	478	250
Регулятор	Параметри налаштування	
	$K_{d1}$	$K_{d2}$
ПІД2	0.3311	6.5990e-006
ПІД2Д	0.0065	0.0100

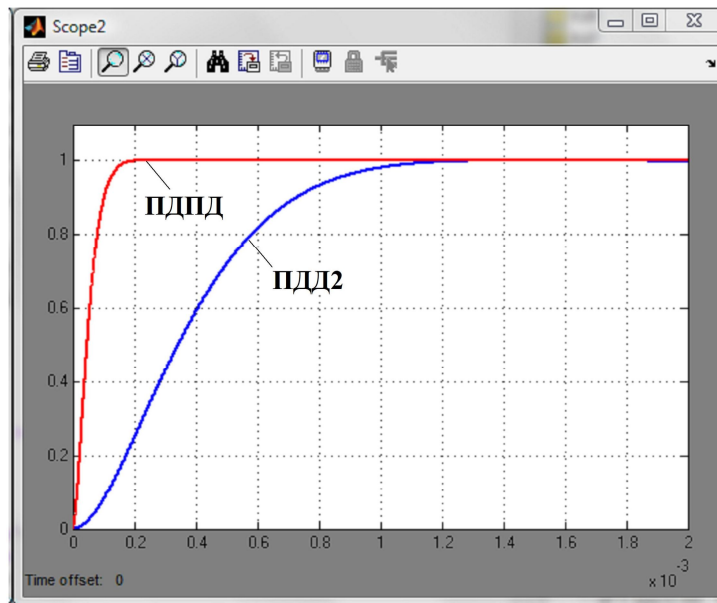


Рисунок 11 – Перехідні функції з ПДД2 та ПДПД-регулятором

Таблиця 7 - Показники якості перехідних процесів

Тип регулятора	Показники якості перехідного процесу	
	час розгону, с	перерегулювання
ПДД2	0.0012	0%
ПДПД	0.0002	0%

**Література**

1 Ротач В.Я. Теория автоматического управления / В.Я. Ротач. – М.: Издательство МЭИ, 2004. – 358 с.  
 2 Ротач В.Я. Расчет настройки реальных ПИД регуляторов / В.Я. Ротач // Теплоэнергетика. – 1993. – № 10. – С. 31-35.  
 3 Кроніковський Д.О. Застосування багатопараметричних регуляторів для складних технологічних об'єктів. / Д.О. Кроніковський, А.П. Ладанюк // Харчова промисловість. – 2009. – № 8. – С. 104-109.

4 Смирнов Н.И. Оптимизация одноконтурных АСР с многопараметрическими регуляторами./ Н.И. Смирнов, В.Р. Сабанин, А.И. Репин // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2005. – № 7. – С. 71-77.  
 5 Смирнов Н.И. Робастные многопараметрические регуляторы для объектов с транспортным запаздыванием / Н.И. Смирнов, В.Р. Сабанин, А.И. Репин // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2006. – № 7. – С. 82-86.  
 6 Лагойда А.І. Аналіз динамічних властивостей відцентрового нагнітача ГПА з газотурбінним приводом як об'єкта керування / А.І. Лагойда, Ю.Є. Бляут, Є.М. Лесів, Г.Н. Семенов // Нафтогазова енергетика. – 2012. – № 2(18). – С. 72-85.

*Стаття надійшла до редакційної колегії  
 16.04.14  
 Рекомендована до друку  
 професором Семеновим Г.Н.  
 (ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)  
 канд. техн. наук Воцинським В.С.  
 (ТОВ СКБЗА, м. Івано-Франківськ)*