

УДК 681.513.52:622.691.4

*Проведено аналіз функції передачі відцентрового нагнітача газоперекачувального агрегату. Наведено методикку визначення параметрів налаштування ПІД- та ПІДД2-регулятора через параметри функції передачі об'єкта. На основі обрахованих значень у програмному продукті Matlab проведено моделювання технологічного процесу з ПІД-, ПІДД2-, ПІДД2ДЗ-, ПІДД2-, ПІДПД-регуляторами та визначено їх оптимальні параметри налаштування, що забезпечить максимальну швидкодію системи*

*Ключові слова: відцентровий нагнітач, регулятор, налаштування, функція передачі, швидкодія, моделювання, помпаж, керування*

*Проведен анализ функции передачи центробежного нагнетателя газоперекачивающего агрегата. Приведена методика определения параметров настройки ПИД- и ПИДД2-регулятора через параметры функции передачи объекта. На основе рассчитанных значений в программном продукте Matlab проведено моделирование технологического процесса с ПИД-, ПИДД2-, ПИДД2ДЗ-, ПИДД2-, ПИДПД-регуляторами и определены их оптимальные параметры настройки, что обеспечит максимальное быстродействие системы*

*Ключевые слова: центробежный нагнетатель, регулятор, настройка, функция передачи, быстродействие, моделирование, помпаж, управление*

# АНТИПОМПАЖНЕ КЕРУВАННЯ ГАЗО- ПЕРЕКАЧУВАЛЬНИМ АГРЕГАТОМ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ БАГАТО- ПАРАМЕТРИЧНИХ РЕГУЛЯТОРІВ

**Г. Н. Семенцов**

Доктор технічних наук, професор\*

E-mail: kafatp@ukr.net

**А. І. Лагойда**

Аспірант\*

E-mail: And\_ij@mail.ru

\*Кафедра автоматизації технологічних процесів і моніторингу в екології Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна, 76019

## 1. Вступ

На дотискувальних компресорних станціях, що працюють на підземних сховищах газу, актуальною є проблема захисту газоперекачувальних агрегатів (ГПА) від помпажу. Щоб уникнути даного явища необхідно удосконалити існуючі методи та розробити нові підходи до антипомпажного регулювання газоперекачувального агрегату.

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 конфузорі 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 [1].

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 [2].

## 2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Аналіз літературних джерел [3, 4] показує, що вирішення задачі антипомпажного керування може бути знайдене шляхом використання методів, які базуються головним чином на аналізі витратно-напірних характеристик нагнітача, або на виявленні коливань у проточній частині нагнітача.

Зробивши аналіз досліджень методу за витратно-напірними характеристиками [4] виявлено, що точка входу в зону помпажу, як і робоча точка відцентрового нагнітача, постійно переміщуються не тільки по відношенню одна до одної, але й по відношенню до даного значення налагоджувальної лінії захисту від помпажу. При цьому за умов експлуатації часто

виникають такі режими роботи нагнітачів, коли точка входу в помпажну зону знаходиться ближче до робочої точки, ніж налагоджувальна лінія захисту від помпажу. Тому експлуатаційний персонал вимушений переналагоджувати лінію захисту від помпажу для запобігання аваріям. Це зміщення, тобто «зона помпажу» може досягати 20–40 % [5], що не припустимо.

Метод, який базується на виявленні коливань у проточній частині нагнітача відносяться до області раннього виявлення нестійкої роботи і базуються на інформації про динаміку зміни контрольованих параметрів. Швидке формування сигналу помпажу веде до зменшення часу перебування компресора у помпажі і зрештою – до збільшення терміну експлуатації компресора [6].

Недоліком всіх вказаних способів є те, що область їх застосування обмежена компресорами і умовами їх експлуатації, для початку помпажу яких вказані зміни параметрів є характерними. Для інших компресорів і умов експлуатації вони не можуть бути використані.

З урахуванням недоліків і переваг розглянутих методів у роботі використано метод, який базується на застосуванні багатопараметричних регуляторів.

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 [7, 8].

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 [9–11]:

$$W(s) = W_0(s)e^{-\tau s}, \tag{1}$$

де  $\tau$  – час запізнення.

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

$$W_0(s) = \frac{K}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1) \dots (T_n s + 1)}, \tag{2}$$

де  $K$  – коефіцієнт передачі.

З урахуванням системного підходу до розв'язання задачі оптимального синтезу АСР порядок знаменника у формулі (2) визначається, з одного боку, з умови адекватності апроксимуючої функції передачі, з іншого боку, отримана в такий спосіб структура буде визначати функцію передачі оптимального регулятора:

$$W_p(s) = K_p + K_i \frac{1}{s} + K_{d1} s + K_{d2} s^2 + \dots, \tag{3}$$

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  $n = 3$  ПІДІД2-ал-

горитм і т. д. При цьому чисельні значення параметрів налаштування досить легко можуть бути виражені через параметри функції передачі об'єкта (табл. 1) [9–11].

Таблиця 1

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

Параметри налаштування	$W(s) = \frac{K}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1) \dots (T_n s + 1)} e^{-\tau s}$	
	n=2 ПІД-алгоритм	n=3 ПІДІД2-алгоритм
$K_p$	$\frac{T_1 + T_2}{K\tau_2}$	$\frac{T_1 + T_2 + T_3}{K\tau_3}$
$K_i$	$\frac{1}{K\tau_2}$	$\frac{1}{K\tau_3}$
$K_{d1}$	$\frac{T_1 T_2}{K\tau_2}$	$\frac{T_1 T_2 + T_1 T_3 + T_2 T_3}{K}$
$K_{d2}$	–	$\frac{T_1 T_2 T_3}{K\tau_3}$

Обраховані в такий спосіб регулятори дадуть уявлення про можливості керування об'єктом.

### 3. Мета та задачі дослідження

Метою даної роботи є розроблення швидкодіючого багатопараметричного регулятора для складних технологічних об'єктів. Це уможливить автоматичне регулювання і захист відцентрового нагнітача від помпажу, що сприяє підвищенню надійності роботи ГПА. Як такий об'єкт розглянемо відцентровий нагнітач газоперекачувального агрегату (ВН ГПА) з газотурбінним приводом.

Завданнями роботи є:

- на основі обробки експериментальних даних отримання функції передачі ВН ГПА;
- розробка багатопараметричного регулятора;
- обрахунок оптимальних параметрів налаштування;
- порівняльний аналіз і вибір оптимального регулятора.

### 4. Експериментальні дані роботи ГПА і їх обробка

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.

Тому, 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, за допомогою якого вимірюється продуктивність  $Q(t)$  який було оцифровано з метою отримання таблиці значень сигналу, який позначимо як  $x(t)$ . Для оцифрування графіку використаємо програму Graph2Digit. Отримані значення експортуємо в програмний продукт MathCad для подальшого визначення числових характеристик випадкових значень (рис. 1).

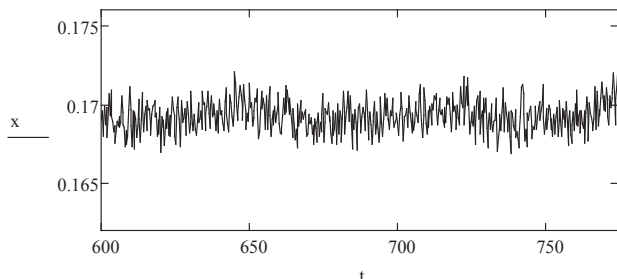


Рис. 1. Відтворений графік зміни продуктивності  $Q(t)=x(t)$  відцентрового нагнітача

Вихідними даними для проведення аналізу вихідного сигналу є також графік зміни ступеня підвищення тиску газу  $E(t)$ . Провівши аналогічні операції як і у першому випадку отримуємо графік наведений на рис. 2.

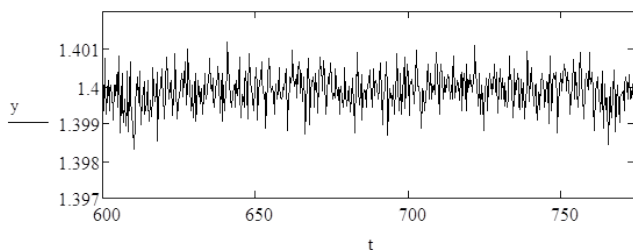


Рис. 2. Відтворений графік функції  $E(t)=y(t)$

На основі дослідження автокореляційної та взаємнокореляційної функцій отримали наступну функцію передачі ВН ГПА [12]:

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

Отриману функцію передачі використовуватимемо у подальших дослідженнях ВН ГПА.

### 5. Результати досліджень багатопараметричних регуляторів

Користуючись програмним продуктом Matlab, побудуємо перехідну функцію ВН ГПА (рис. 3):

```
>> 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)
```

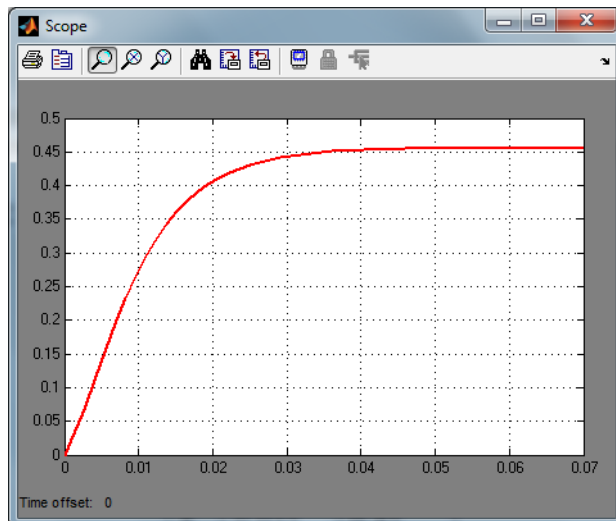


Рис. 3. Перехідна функція ВН ГПА як об'єкта керування

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

Таблиця 2

Параметри досліджуваних регуляторів

Параметри налаштування	n=2 ПІД-алгоритм	n=3 ПІДД2-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	перерегулювання
ПІД	0,0438	0
ПІДД2	0,0423	0

Проте, 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, ПІДД2, ПІДД2Д3), загальні структури яких наведено на рис. 4, 5.

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 у табл. 4, 5.

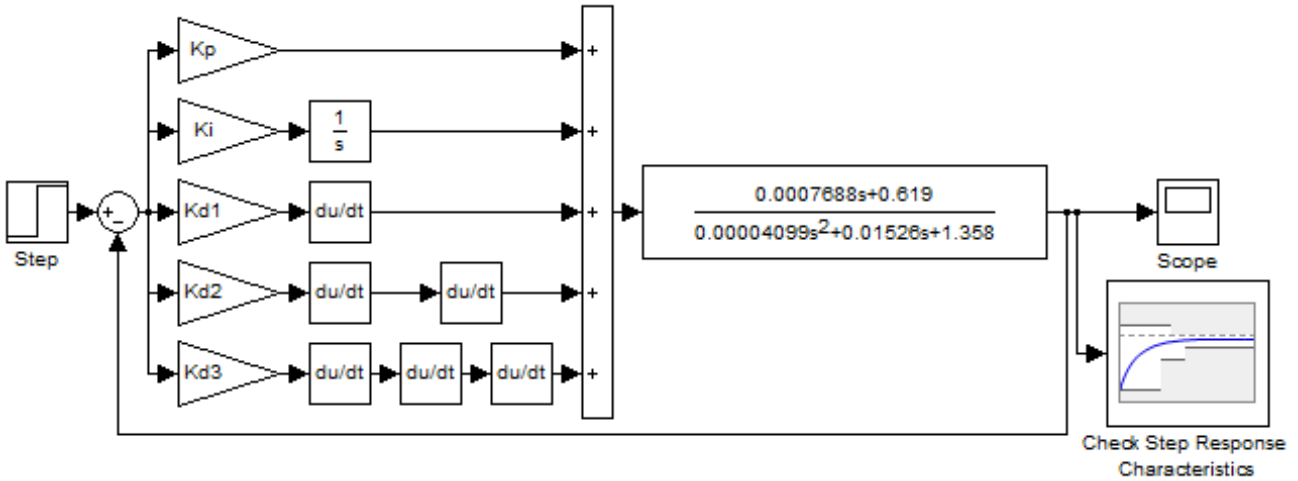


Рис. 4. Структурна схема з ПДД2Д3-регулятором в Matlab

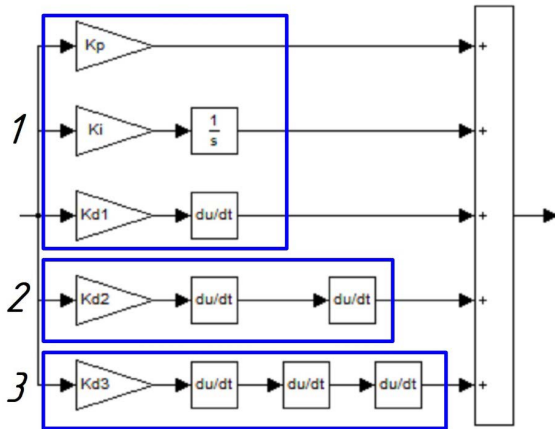


Рис. 5. Структура ПІД(1), ПІДД2(1+2), ПІДД2Д3(1+2+3) регуляторів

Як відомо [13], швидкодія системи буде найбільшою тоді, коли функція передачі регулятора буде оберненою до функції передачі об'єкта. Отже, функція передачі ідеального регулятора матиме вигляд:

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

На основі функції передачі 5 розроблено ПДД2-регулятор (рис. 6) та ПДПД-регулятор (рис. 7) із двома ПД-регуляторами сполученими послідовно [13].

Результати моделювання перехідних процесів з відповідними регуляторами наведені у табл. 6, 7 та на рис. 8.

Таблиця 6

Параметри налаштування регуляторів після оптимізації

Регулятор	Параметри налаштування			
	$K_{p1}$	$K_{p2}$	$K_{d1}$	$K_{d2}$
ПДД2	1.0324e+ 003	-	0.3311	6.5990e-006
ПДПД	478	250	0.0065	0.0100

Таблиця 7

Показники якості перехідного процесу

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

Як бачимо, в порівнянні із звичайним регулятором швидкодія системи значно підвищилась.

Таблиця 4

Параметри налаштування регуляторів після оптимізації

Регулятор	Параметри налаштування				
	$K_p$	$K_i$	$K_{d1}$	$K_{d2}$	$K_{d3}$
ПІД	29.7958	867.4924	0.0579	-	-
ПІДД2	29.7958	830	0.0579	9.7480e-010	-
ПІДД2Д3	33.3	950	0.0528	5.9480e-009	3.7480e-022

Таблиця 5

Показники якості перехідних процесів

Тип регулятора	Показники якості перехідного процесу	
	час розгону	перерегулювання
ПІД	0.01125	0 %
ПІДД2	0.01075	0 %
ПІДД2Д3	0.0087	0 %

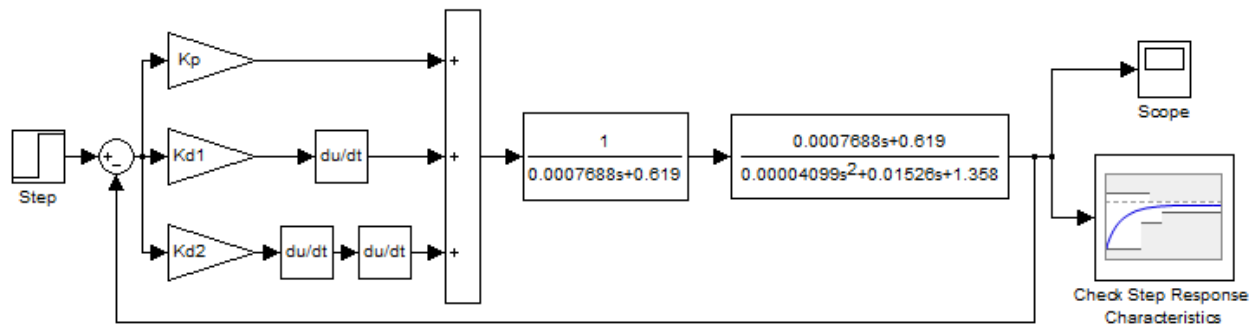


Рис. 6. Структурна схема з ПДД2-регулятором в Matlab

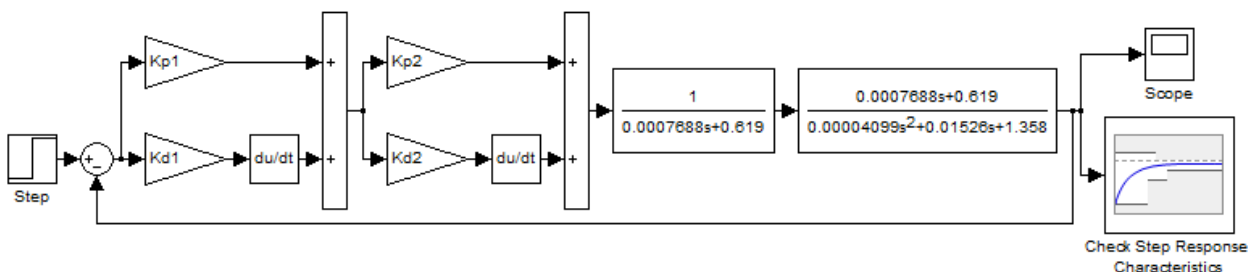


Рис. 7. Структурна схема з ПДПД-регулятором в Matlab

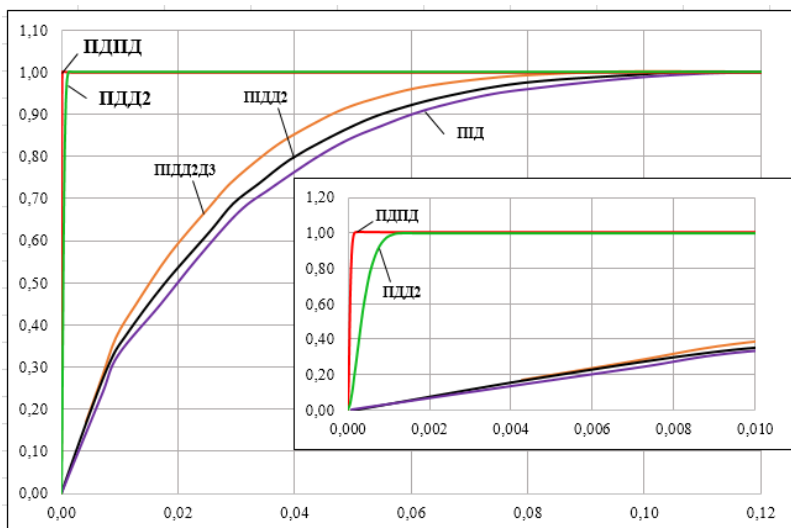


Рис. 8. Результати дослідження

### 6. Висновок

У результаті проведених досліджень отримано регулятор, який значно підвищив швидкість системи антипомпажного регулювання відцентрового нагнітача газоперекачувального агрегату дотискувальної компресорної станції підземного сховища газу за рахунок зміни структури існуючого регулятора.

В процесі дослідження системи із використанням багатопараметричних регуляторів встановлено, що у порівнянні з ПД-регулятором швидкість системи збільшиться при: ПДД2-регуляторі на 4,44 %, ПДД2ДЗ-регуляторі на 22,67 %, ПДД2-регуляторі на 89,33 %, та ПД-ПД-регуляторі на 98,22 %.

### Література

1. Технологічні вимоги до систем антипомпажного регулювання відцентрових нагнітачів газоперекачувальних агрегатів [Текст] / К.: ДК «Укртрансгаз», 1999. – № 399. – 9 с.
2. Семенцов, Г. Н. Автоматична система антипомпажного регулювання відцентрових нагнітачів дотискувальної компресорної станції [Текст] / Г. Н. Семенцов, С. Г. Гірник, Ю. Є. Бляут // Нафтогазова енергетика. – 2010. – № 2 (13). – С. 44–53.
3. Козакевич, В. В. Автоколебання (помпаж) в компресорах [Текст] / В. В. Козакевич. – М.: Машиностроение, 1974. – 264 с.
4. Измайлов, Р. А. Нестационарные процессы в центробежных компрессорах [Текст] / Р. А. Измайлов, К. П. Селезнев // Химическое и нефтяное машиностроение. – 1995. – № 11. – С. 20–24.
5. Мамонов, О. І. Впровадження енергозберігаючих технологій при протипомпажному керуванні нагнітачами [Текст] / О. І. Мамонов, В. О. Таргонський, В. В. Ніщета // Інформаційний огляд ДК «Укртрансгаз». – 2006. – № 1 (37). – С. 6–7.
6. Письменский, И. Л. Многочастотные нелинейные колебания в газотурбинном двигателе [Текст] / И. Л. Письменский. – М.: Машиностроение, 1987. – 128 с.
7. Ротач, В. Я. Теория автоматического управления [Текст] / В. Я. Ротач. – М.: Издательство МЭИ, 2004. – 358 с.



8. Ротач, В. Я. Расчет настройки реальных ПИД регуляторов [Текст] / В. Я. Ротач // Теплоэнергетика. – 1993. – № 10. – С. 31–35.
9. Кроніковський, Д. О. Застосування багатопараметричних регуляторів для складних технологічних об'єктів [Текст] / Д. О. Кроніковський, А. П. Ладанюк // Харчова промисловість. – 2009. – № 8. – С. 104–109.
10. Смирнов, Н. И. Оптимизация одноконтурных АСР с многопараметрическими регуляторами [Текст] / Н. И. Смирнов, В. Р. Сабанин, А. И. Репин // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2005. – № 7. – С. 71–77.
11. Смирнов, Н. И. Робастные многопараметрические регуляторы для объектов с транспортным запаздыванием [Текст] / Н. И. Смирнов, В. Р. Сабанин, А. И. Репин // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2006. – № 7. – С. 82–86.
12. Лагойда, А. І. Аналіз динамічних властивостей відцентрового нагнітача ГПА з газотурбінним приводом як об'єкта керування [Текст] / А. І. Лагойда, Ю. Є. Бляут, Є. М. Лесів, Г. Н. Семенцов // Нафтогазова енергетика. – 2012. – № 2 (18). – С. 72–85.
13. Лагойда, А. І. Метод підвищення швидкодії системи автоматичного антипомпажного регулювання газоперекачувального апарату [Текст] / А. І. Лагойда, Г. Н. Семенцов // Сборник научных трудов SWorld. – 2013. – № 9. – С. 35–45.

*Досліджені та представлені основні властивості базових з'єднань дросельних елементів, які впливають на характеристики газодинамічних засобів, зокрема систем приготування сумішей. Продемонстровано ефективність поєднання досліджених дросельних схем на прикладі створення газодинамічних систем синтезу складних сумішей з мікроконцентраціями компонентів і з політисеними метрологічними (точність задання і підтримання концентрацій компонентів) та експлуатаційними характеристиками*

*Ключові слова: базова дросельна схема, газодинамічна система, синтез газових сумішей, капіляр*

*Исследованы и представлены основные свойства базовых соединений дросельных элементов, которые влияют на характеристики газодинамических средств, в частности систем приготовления смесей. Продемонстрирована эффективность сочетания исследованных дросельных схем для разработки газодинамических систем синтеза сложных смесей с микроконцентрациями компонентов, которые имеют улучшенные метрологические (точность задания и поддержания концентраций компонентов) и эксплуатационные характеристики*

*Ключевые слова: базовая дросельная схема, газодинамическая система, синтез газовых смесей, капилляр*

УДК 681.2.53.082.3

## ОПТИМАЛЬНИ ДРОСЕЛЬНІ СХЕМИ ДИНАМІЧНИХ СИСТЕМ ПРИГОТУВАННЯ СКЛАДНИХ ГАЗОВИХ СУМІШЕЙ

**І. В. Ділай**

Кандидат технічних наук\*

E-mail: divlv@ukr.net

**З. М. Теплюх**

Доктор технічних наук\*

E-mail: atxp2010@gmail.com

**Ю. З. Вашкурак**

Кандидат технічних наук\*

E-mail: vyzlv@ukr.net

\*Кафедра автоматизації теплових і

хімічних процесів

Національний університет

«Львівська політехніка»

вул. С. Бандери, 12, м. Львів, Україна, 79013

### 1. Вступ

До дросельних систем і пристроїв можна віднести складні сполучення різнотипних дроселів в пневмоавтоматиці, зокрема, системи транспортування газу, задання тисків і витрат, кондиціонування і дозування проби газу, приготування газових сумішей тощо [1, 2]. Серед таких систем розмаїттям і кількістю дроселів схем відзначаються системи приготування (синтезу) газових сумішей заданого складу, особливо це стосується систем неперервного (динамічні системи) синтезу складних багатоконпонентних газових сумішей з мікроконцентраціями окремих компонентів [3, 4]. До основних базових схем можна віднести суматор

потоків, подільник газового потоку, пакет капілярів, подільник тиску, а також каскадні з'єднання подільників тиску і подільників газового потоку.

Крім того, у таких схемах як дроселі в принципі можуть бути застосовані різні конструктивні елементи – циліндричні довгі канали, круглі отвори, сопло-заслінка, конус-сідло тощо [2]. Очевидним є, що як від самої схеми системи так і типу її елементів будуть суттєво залежати її характеристики. У зв'язку з цим для моделювання відомих систем, а також побудови нових з якісними характеристиками, необхідно виокремити із загальних схем і дослідити типи елементарні (базові) схеми, дослідження яких забезпечили би виявлення корисних властивостей для побудови систем