

## **АВТОМАТИЧНА ІДЕНТИФІКАЦІЯ РЕАЛЬНИХ ПРИВЕДЕНИХ ВИТРАТНО-НАПІРНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВІДЦЕНТРОВИХ НАГНІТАЧІВ**

**Ю.Є. Бляут, Л.І. Давиденко**

*ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 46067,  
e-mail: kafatp@ukr.net*

*Розглядається актуальна науково-практична задача, що полягає в розробленні методів ідентифікації реальних приведених витратно-напірних характеристик відцентрових нагнітачів газоперекачувальних агрегатів. Для вирішення цієї задачі використано реальні витратно-напірні характеристики газоперекачувального агрегату № 9 дотискувальної компресорної станції підземного сховища газу "Більче-Волиця". Для апроксимації заданих семи характеристик скористалися методом комп'ютерного моделювання та програмним пакетом Curve Expert-2. Проаналізовано коефіцієнти кореляції і стандартні похибки для восьми моделей, що дало змогу вибрати моделі 5th÷7th Degree Polinomial Fit для апроксимації реальних витратно-напірних характеристик у стабільному режимі роботи відцентрового нагнітача. Удосконалено технологію визначення приведених характеристик відцентрового нагнітача, яка впроваджена в системі автоматичного керування газоперекачувального агрегату дотискувальної компресорної станції підземного сховища газу "Більче-Волиця". Досвід експлуатації підтвердив ефективність запропонованого методу. Запропоновано алгоритм програми побудови графіків приведених витратно-напірних характеристик.*

**Ключові слова:** відцентровий нагнітач, витратно-напірна характеристика, ступінь підвищення тиску газу, масова витрата газу, зона помпажу.

*Рассматривается актуальная научно-практическая задача, заключающаяся в разработке методов идентификации реальных приведенных расходно-напорных характеристик центробежных нагнетателей газоперекачивающих агрегатов. Для решения этой задачи использованы реальные расходно-напорные характеристики газоперекачивающего агрегата № 9 дожимной компрессорной станции подземного хранилища газа "Бильче-Волиця". Для аппроксимации заданных семи характеристик воспользовались методом компьютерного моделирования с использованием программного пакета Curve Expert-2. Проанализированы коэффициенты корреляции и стандартные погрешности для восьми моделей, что позволило выбрать модели 5th ÷ 7th Degree Polinomial Fit для аппроксимации реальных расходно-напорных характеристик в установившемся режиме центробежного нагнетателя. Усовершенствована технология определения приведенных характеристик центробежного нагнетателя, которая внедрена в системе автоматического управления газоперекачивающего агрегата дожимной компрессорной станции подземного хранилища газа "Бильче-Волиця". Опыт эксплуатации подтвердил эффективность предложенного метода. Предложен алгоритм программы построения графиков приведенных расходно-напорных характеристик.*

**Ключевые слова:** центробежный нагнетатель, расходно-напорная характеристика, степень повышения давления газа, массовый расход газа, зона помпажа.

*An urgent scientific and practical problem of developing methods for indentifying the real head-flow characteristics of centrifugal superchargers of gas compressing units is considered. In order to resolve this problem real head-flow characteristics of a gas pumping unit #9 of the booster compressor station of underground gas storage. For the approximation of seven given characteristics, computer simulation method was used with Curve Expert-2 software package. Correlation coefficients and standard errors the eight models have been analyzed, which allowed choosing 5<sup>th</sup> ÷ 7<sup>th</sup> Degree Polinomial Fit model for the approximation of real head-flow characteristics in a stable operation mode of centrifugal supercharger operation. The technology of determining the given characteristics of a centrifugal supercharger has been improved and introduced in an automatic control system of gas compressing unit of a booster station of Bilche-Volytsya underground gas storage. The experience of operating confirmed the efficiency of the proposed method. A program algorithm for graph plotting the given head-flow characteristics has been suggested.*

**Keywords:** centrifugal supercharger, head-flow characteristics, gas pressure ratio, mass flowrate of gas, zone of surging.

**Вступ.** Розроблення методів ідентифікації реальних приведених витратно-напірних характеристик відцентрових нагнітачів (ВН) газоперекачувальних агрегатів (ГПА) дотискувальної компресорної станції (ДКС) підземного сховища газу (ПСГ) є актуальною науково-практичною задачею для газотранспортної промисловості України [1÷4] у зв'язку з тим, що одним з найбільш використовуваних в умовах експлуатації режимів роботи ГПА є такий режим, коли робоча точка характеристики ВН знаходить-

ся неподалік межі помпажної зони. При цьому забезпечуються максимальні ККД та завантаження ГПА. Проте, за такого режиму роботи ВН ГПА необхідно забезпечити стабільну роботу ВН і не дати робочій точці витратно-напірної характеристики переміститися в зону помпажу. Це завдання повинна вирішувати автоматична система антипомпажного керування і захисту: забезпечити стабільну і надійну роботу ВН поблизу границі помпажної зони.

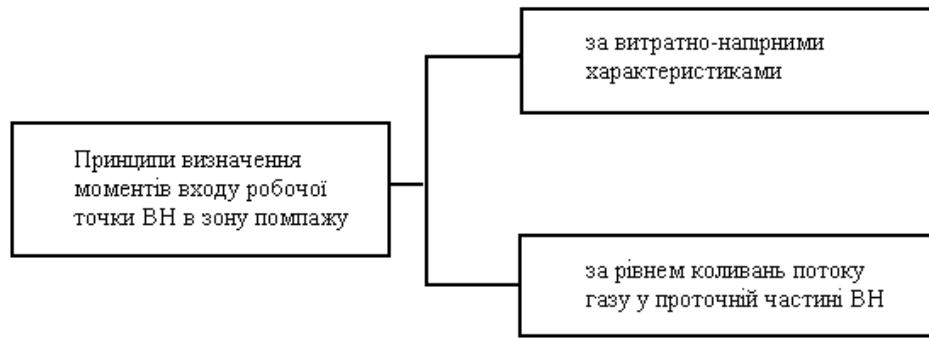


Рисунок 1 – Класифікація принципів виявлення моментів входу робочої точки ВН до зони помпажу

**Аналіз стану досліджень та публікацій.** Перші дослідження нестационарних процесів у відцентрових компресорах були розпочаті у 1958р. у проблемній лабораторії компресобудування в Санкт-Петербурзі. В останні роки актуальною стала проблема діагностування і запобігання помпажу, що базується на нових принципах [1÷5 та ін.]. Відомо кілька принципів виявлення моментів входу робочої точки ВН в зону помпажу (рис. 1).

Ця проблема розглядається багатьма авторами, але через свою складність та багатоплановість вона не втрачає актуальності.

**Виділення невирішених частин.** Аналіз літературних джерел [1÷8 та ін.] свідчить про недостатній об'єм проведених досліджень у цьому напрямку, хоча автоматична ідентифікація помпажних характеристик і визначення експлуатаційних характеристик ВН і агрегату загалом є головними функціями системи автоматичного керування ГПА. Це викликано тим, що саме на базі цих характеристик виробляється рішення про необхідність оновлення помпажних характеристик ВН або проведення профілактичних робіт на двигуні та нагнітачі.

**Формування цілі.** Метою даної роботи є розроблення методу автоматичної ідентифікації приведених витратно-напірних характеристик відцентрового нагнітача ГПА ДКС ПСГ. Розроблення методу базується на застосуванні програмно-технологічного комплексу оперативного контролю та передачі даних про стан технологічного обладнання, який експлуатується на ДКС СПГ "Більче-Волиця".

**Виклад основного матеріалу.** Оскільки основними характеристиками ВН є залежності ступеня підвищення тиску газу  $E$ , політропного коефіцієнта потужності (ККД)  $\eta_{пол}$  і внутрішньої потужності  $N_i$  від витрати  $Q_g$  за різні частоти обертання ротора, то можна записати, що [5]:

$$E, \eta_{пол}, N_i = f_{1,2,3}(Q_g, p_g, \rho_g, D_2, \omega), \quad (1)$$

де:  $Q_g$  – витрата;  
 $p_g$  – тиск;

$\rho$  – густина газу за умов всмоктування, званих, зазвичай, початковими;

$D_2$  – діаметр робочого колеса;

$\omega$  – кутова швидкість.

На підставі теорії подібності залежність (1) подають у критеріальній формі:

$$E, \eta_{пол}, \frac{N_i}{\rho_g D_2^2 u_2^3} = f_{1,2,3} \left( \frac{Q_g}{D_2^2 u_2}, \frac{u_2}{\sqrt{z_g R T_g}} \right), \quad (2)$$

де:  $u_2 = D_2 \omega$  – колова швидкість;

$\frac{Q_g}{D_2^2 u_2}$  – коефіцієнт витрати;

$\frac{u_2}{\sqrt{z_g R T_g}}$  – число Маха;

$T_g$  – температура (°K);

$R$  – газова стала, Дж/кг·K;

$z_g$  – коефіцієнт стисливості природного газу.

Згідно з (2) можна побудувати графіки за-

лежності безрозмірної потужності  $\frac{N_i}{\rho_g D_2^2 u_2^3}$  від

безрозмірної витрати  $\frac{Q_g}{D_2^2 u_2}$  за різних чисел

Маха. Проте, поступають інакше.

Оскільки  $D_2$  – задана постійна величина, змінюють колову швидкість  $u_2$  частотою обертання ротора  $n$  і переходять до наступного виразу:

$$E, \eta_{пол}, \frac{N_i}{\rho_g n^3} = f_{1,2,3} \left( \frac{Q_g}{n}, \frac{n}{\sqrt{z_g R T_g}} \right), \quad (3)$$

де  $\frac{N_i}{\rho_g n^3}$ ,  $\frac{Q_g}{n}$  і  $\frac{n}{\sqrt{z_g R T_g}}$  – розмірні величини,

пропорційні відповідним безрозмірним параметрам в формулі (2).

Щоб формули були придатними для обчислення характеристик природних газів різного складу, їх приводять до фіксованих, доцільно вибраних умов. Параметри приведення:  $R_{np}=490$  Дж/(кг·K);  $T_{B,np} = 288$  K;  $Z_{np}= 0,91$  і  $n_{np} = n_n$  (номінальна).

В результаті отримуємо:

$$E, \eta_{пол}, \left[ \frac{N_i}{\rho_B} \right] = f_{1,2,3} \left( Q_{np}, \left( \frac{n}{n_u} \right)_{np} \right), \quad (4)$$

$$\left[ \frac{N_i}{\rho_B} \right]_{np} = \left( \frac{N_i}{\rho_B} \left( \frac{n_u}{n} \right)^3 \right);$$

$$Q_{np} = Q_B \frac{n_u}{n};$$

$$\left( \frac{n}{n_u} \right)_{np} = \frac{n}{n_u} \sqrt{\frac{z_{B,np} R_{np} T}{z_B R T_B}}. \quad (5)$$

Такі характеристики, які називаються приведеними, вперше були розроблені у ВНДгазі. У результаті великої кількості натурних випробувань ВН ВНДгазом видані спеціальні альбоми приведених характеристик.

Ідентифікація приведених характеристик ВН газоперекачувальних агрегатів з газотурбінним приводом в реальному часі є важливою науково-практичною проблемою у зв'язку з тим, що на основі таких характеристик формується висновок про необхідність проведення профілактичних робіт на двигуні і ВН, або про оновлення помпажних характеристик. Крім того, за допомогою знайденого відхилення ступеня підвищення тиску газу  $E$  коригуватимуться параметри системи антипомпажного регулювання і захисту, інтенсивність керування байпасним краном для регулювання витрати.

Приведена об'ємна витрата нагнітача ( $\text{м}^3/\text{хв}$ ) визначається за формулою:

$$Q_{np} = Q \frac{n_{ном}}{n}, \quad (6)$$

де:  $n_{ном}$  – номінальна частота обертання ротора ВН, об/хв;

$n$  – фактична частота обертання, об/хв.

Під час розрахунку приведених характеристик ВН необхідно визначити:

- газову сталу  $R$ , Дж/кг·К

$$R = \frac{288}{\Delta}, \quad (7)$$

де: 288 – газова стала повітря, Дж/кг·К;

$\Delta$  – відносна густина газу за повітрям;

• густину газу за  $T=293^\circ\text{K}$  і  $P=0,1013$  МПа,  $\text{кг}/\text{м}^3$ :

$$\rho_i = \Delta \cdot 1,206, \quad (8)$$

де 1,206 – густина повітря за стандартних умов,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

• коефіцієнт стисливості природного газу  $Z$ , який визначається за номограмою,

- густину газу при всмоктуванні,  $\text{кг}/\text{м}^3$ :

$$\rho = \frac{P \dot{a} \dot{\sigma}}{Z \cdot R \cdot T}, \quad (9)$$

де  $P_{ex}$  і  $T$  – абсолютні значення тиску (Па) і температури ( $^\circ\text{K}$ ) при всмоктуванні;

- приведену частоту обертання:

$$\left[ \frac{n}{n_u} \right]_{np} = \frac{n}{n_u} \sqrt{\frac{Z_{np} R_{np} T_{np}}{Z \cdot R \cdot T}}, \quad (10)$$

де  $Z_{np}$ ,  $R_{np}$ ,  $T_{np}$  – параметри газу, які приймаються за характеристикою ВН;

- тиск на виході ВН, МПа:

$$P_{вих} = P_{ex} \cdot E. \quad (11)$$

Після обчислення приведеної витрати за вимірними параметрами ГПА визначається приведена ступінь підвищення тиску газу нагнітача, яка відповідає приведеним параметрам газу, за формулою:

$$E_{np} = E \left[ \left( \frac{n}{n_{ном}} \right)_{np} \right]^{-2}, \quad (12)$$

де:  $E$  – ступінь підвищення тиску газу нагнітача;

$E_{np}$  – приведена ступінь підвищення тиску газу нагнітача;

$(n/n_{ном})_{np}$  – приведена відносна частота обертання нагнітача.

Найбільш простою моделлю витратно-напірної характеристики  $E = f(Q)$  є двочленна модель Немудрова [12]:

$$E^2 = a - bQ^2, \quad (13)$$

де  $a$  і  $b$  – коефіцієнти моделі, які підлягають ідентифікації.

Щоб знайти коефіцієнти  $a$  і  $b$  за характеристикою  $E = f(Q)$ , вибирають дві точки 1 і 2 та визначають їх координати  $E_1, Q_1; E_2, Q_2$ .

Тоді одержимо систему лінійних рівнянь для знаходження невідомих коефіцієнтів  $a$  і  $b$ :

$$E_1^2 = a - bQ_1^2,$$

$$E_2^2 = a - bQ_2^2.$$

Звідси одержимо:

$$b = (E_2^2 - E_1^2)(Q_1^2 - Q_2^2)^{-1},$$

$$a = E_1^2 \left( \frac{E_2^2 - E_1^2}{Q_1^2 - Q_2^2} \right) \cdot Q_1^2. \quad (14)$$

Проте аналіз похибок такої апроксимації методом МНК довів, що для вирішення задачі ідентифікації витратно-напірних характеристик ВН потрібен більш точний результат.

Для цього використаємо витратонапірні характеристики  $E = f(Q_{np})$  відцентрового нагнітача ГПА №9 ДКС ПСГ "Більче-Волиця" (рис. 2).

Для апроксимації заданих семи характеристик  $E = f(Q_{np})$ , нумерацію яких здійснено зверху до низу, скористаємося методом комп'ютерного моделювання і програмним пакетом Curve Expert – 2.

Похибка апроксимації оцінюється стандартною абсолютною середньоквадратичною похибкою

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k \Delta_i^2}{k}}, \quad (15)$$

де  $\Delta_i$  – різниця між заданим значенням функції і функцією апроксимації;

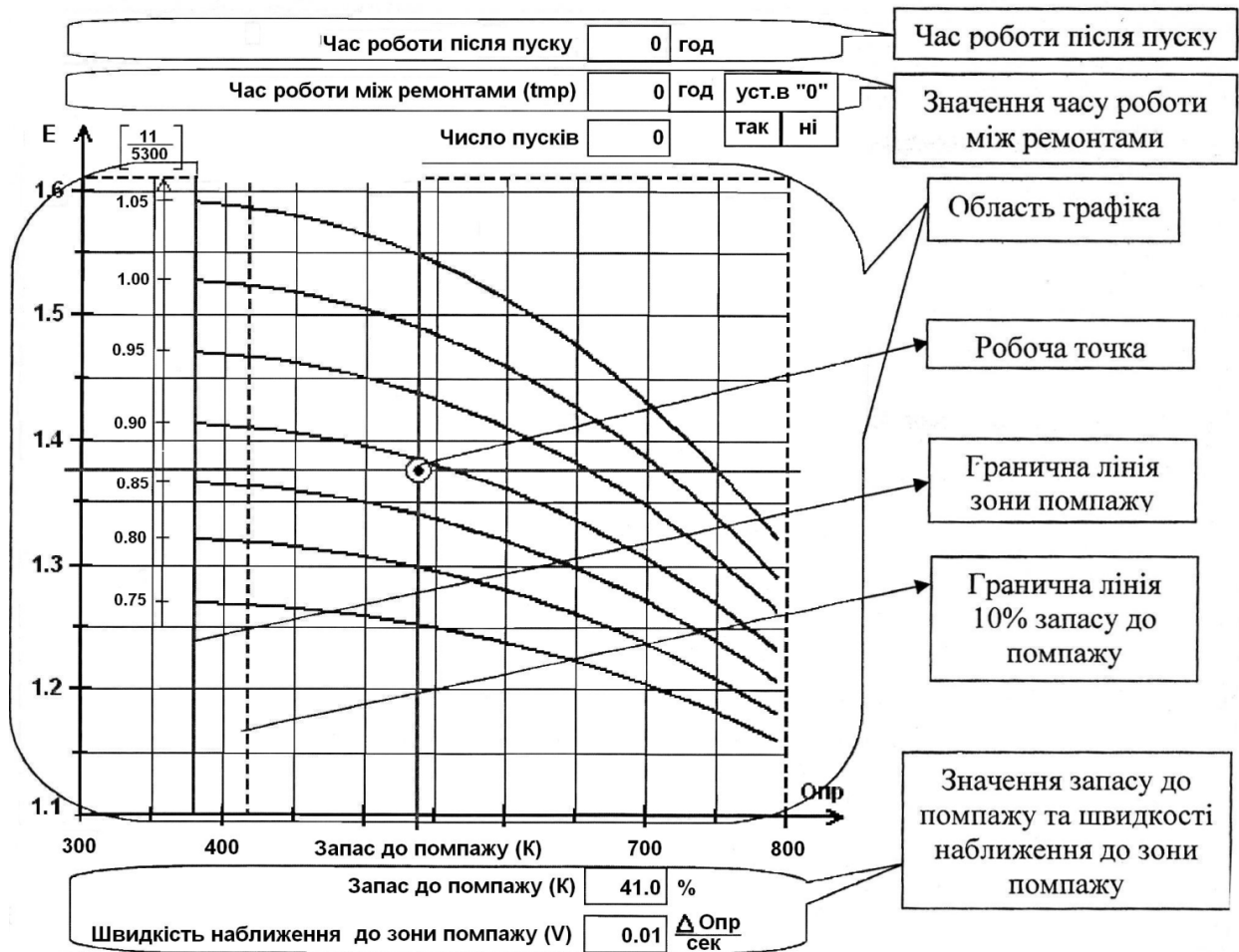


Рисунок 2 – Витратно-напірні характеристики відцентрового нагнітача

$k$  – кількість вузлів заданої вихідної функції,  $k=18$ ;

$i = 1, 2, \dots, k$ .

Для порівняння виберемо вісім інформаційних моделей: лінійну, квадратичну, поліном 3 порядку, поліном 4 порядку, синусоїдальну, поліном 5 порядку, поліном 6 порядку, поліном 7 порядку. В програмі позначення  $E$  змінено на  $y$ , а  $Q_{np}$  – на  $x$ .

Результати аналізу наведено в табл. 1.

Аналіз результатів, наведених в табл. 1, засвідчив, що для опису всіх семи витратно-напірних характеристик  $E = f(Q_{np})$  відцентрового нагнітача найбільш підходить інформаційна модель 7<sup>th</sup> Degree Polynomial Fit, для якої коефіцієнт кореляції коливається в межах  $r = 0,9995 \div 0,9998$ , а стандартна похибка  $S = 0,0008 \div 0,003$ .

На рис. 3 наведено приклади апроксимації першої кривої залежності  $E = f(Q_{np})$  синусоїдальною моделями Sinusoidal Fit та Polynomial Fit 5-го, 6-го і 7-го порядків.

Враховуючи, що стандартні похибки  $S$  і коефіцієнти кореляції  $r$  для декількох моделей не набагато відрізняються один від одного, проаналізуємо якість моделей з позиції найкращого співвідношення “коефіцієнт кореляції/стандартна похибка” і обиратимемо ту математичну модель, для якої коефіцієнт кореляції  $r \rightarrow \max$ , а стандартна похибка  $S \rightarrow \min$ .

Для цього скористуємося результатами, наведеними в табл.1. Результати обчислень критерію  $r/S$  наведено в табл. 2 і на рис. 4, 5.

Аналіз отриманих результатів дає підставу для висновку, що за критерієм  $r/S$  найкраща апроксимація витратно-напірних характеристик  $E = f(Q_{np})$  відцентрових нагнітачів ГПА здійснюється трьома моделями 5th ÷ 7th Degree Polynomial Fit. Проте для характеристики L1 і L4 кращий результат дає апроксимація поліномом 4-го порядку, для L2 – поліномом шостого порядку, для L3, L5, L6, L7 – поліномом сьомого порядку. Отже найбільш ефективним є використання поліномів 4÷7 порядків для реальної витратно-напірної характеристики в стабільному режимі роботи відцентрового нагнітача.

Для стабільного режиму роботи нагнітача визначається [12] витрата за формулою:

$$Q = K_{\text{конф}} \sqrt{\Delta P_{\text{конф}} \cdot \rho^{-1}}, \quad (16)$$

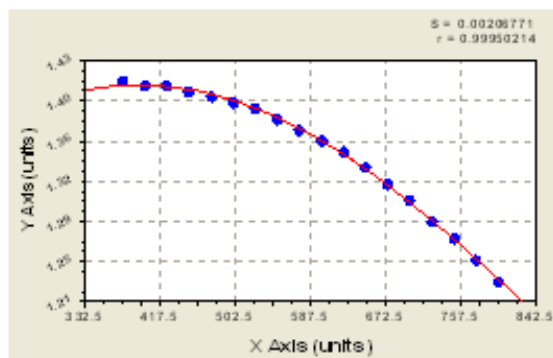
де:  $Q$  – об’ємна витрата газу на вході ВН;  $K_{\text{конф}}$  – коефіцієнт витрати конфузора;  $\Delta P_{\text{конф}}$  – перепад тиску на конфузوری;  $\rho$  – густина газу на вході ВН.

**Таблиця 1 – Результати аналізу залежності ступеня підвищення тиску газу Е від приведеної масової витрати газу  $Q_{np}$**

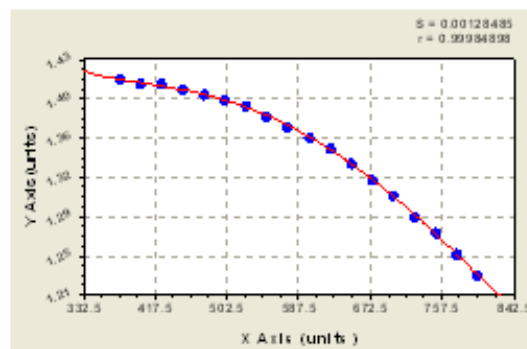
Модель	Рівняння	Коефіцієнт кореляції, r	Стандартна похибка, S
1	2	3	4
<b>Крива 1</b>			
лінійна	$y=a+bx$	0,96576963	0,02304000
квадратична	$y=a+bx+cx^2$	0,99962122	0,00252460
поліном 3 порядку	$y=a+bx+cx^2+dx^3$	0,99967370	0,00242545
поліном 4 порядку	$y=a+bx+cx^2+dx^3+ex^4$	0,99969228	0,00244434
синусоїдальна	$y=a+b \cdot \cos(cx+d)$	0,9995021	0,0020677
поліном 5 порядку	$y=a+bx+cx^2+dx^3+ex^4+fx^5$	0,9998477	0,0012355
поліном 6 порядку	$y=a+bx+cx^2+dx^3+ex^4+fx^5+gx^6$	0,9998490	0,0012848
поліном 7 порядку	$y=a+bx+cx^2+dx^3+ex^4+fx^5+gx^6+hx^7$	0,9998662	0,0012684
<b>Крива 2</b>			
лінійна	$y=a+bx$	0,96701788	0,02040264
квадратична	$y=a+bx+cx^2$	0,99919391	0,00332106
поліном 3 порядку	$y=a+bx+cx^2+dx^3$	0,99923449	0,00335002
поліном 4 порядку	$y=a+bx+cx^2+dx^3+ex^4$	0,99939916	0,00308006
синусоїдальна	$y=a+b \cdot \cos(cx+d)$	0,9989166	0,0039850
поліном 5 порядку	$y=a+bx+cx^2+dx^3+ex^4+fx^5$	0,9994350	0,0031088
поліном 6 порядку	$y=a+bx+cx^2+dx^3+ex^4+fx^5+gx^6$	0,9994900	0,0030848
поліном 7 порядку	$y=a+bx+cx^2+dx^3+ex^4+fx^5+gx^6+hx^7$	0,9995051	0,0031874
<b>Крива 3</b>			
лінійна	$y=a+bx$	0,96519926	0,01845011
квадратична	$y=a+bx+cx^2$	0,99930144	0,00272306
поліном 3 порядку	$y=a+bx+cx^2+dx^3$	0,99930844	0,00280447
поліном 4 порядку	$y=a+bx+cx^2+dx^3+ex^4$	0,99957635	0,00227805
синусоїдальна	$y=a+b \cdot \cos(cx+d)$	0,9991824	0,0030493
поліном 5 порядку	$y=a+bx+cx^2+dx^3+ex^4+fx^5$	0,9995789	0,0023638
поліном 6 порядку	$y=a+bx+cx^2+dx^3+ex^4+fx^5+gx^6$	0,9995800	0,0024657
поліном 7 порядку	$y=a+bx+cx^2+dx^3+ex^4+fx^5+gx^6+hx^7$	0,9997275	0,0020832
<b>Крива 4</b>			
лінійна	$y=a+bx$	0,96713263	0,01558752
квадратична	$y=a+bx+cx^2$	0,99977371	0,00134683
поліном 3 порядку	$y=a+bx+cx^2+dx^3$	0,99978345	0,00136378
поліном 4 порядку	$y=a+bx+cx^2+dx^3+ex^4$	0,99984672	0,00119071
синусоїдальна	$y=a+b \cdot \cos(cx+d)$	0,99950214	0,00206771
поліном 5 порядку	$y=a+bx+cx^2+dx^3+ex^4+fx^5$	0,99984766	0,00123554
поліном 6 порядку	$y=a+bx+cx^2+dx^3+ex^4+fx^5+gx^6$	0,99984898	0,00128485
поліном 7 порядку	$y=a+bx+cx^2+dx^3+ex^4+fx^5+gx^6+hx^7$	0,99986622	0,00126836
<b>Крива 5</b>			
лінійна	$y=a+bx$	0,97101229	0,01251999
квадратична	$y=a+bx+cx^2$	0,99893850	0,00249188
поліном 3 порядку	$y=a+bx+cx^2+dx^3$	0,99901079	0,00249000
поліном 4 порядку	$y=a+bx+cx^2+dx^3+ex^4$	0,99918870	0,00234022
синусоїдальна	$y=a+b \cdot \cos(cx+d)$	0,99856329	0,00300048
поліном 5 порядку	$y=a+bx+cx^2+dx^3+ex^4+fx^5$	0,99925780	0,00232979
поліном 6 порядку	$y=a+bx+cx^2+dx^3+ex^4+fx^5+gx^6$	0,99925791	0,00243320
Поліном 7 порядку	$y=a+bx+cx^2+dx^3+ex^4+fx^5+gx^6+hx^7$	0,99962110	0,00182369

Продовження таблиці 1

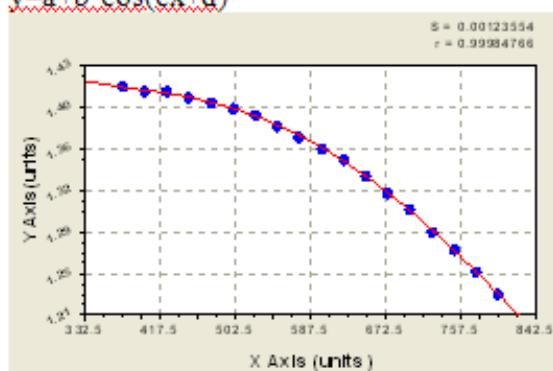
Модель	Рівняння	Коефіцієнт кореляції, r	Стандартна похибка, S
1	2	3	4
<b>Крива 6</b>			
лінійна	$y=a+bx$	0.96599327	0.01210581
квадратична	$y=a+bx+cx^2$	0.99931072	0.00179504
поліном 3 порядку	$y=a+bx+cx^2+dx^3$	0.99935881	0.00179207
поліном 4 порядку	$y=a+bx+cx^2+dx^3+ex^4$	0.99940705	0,00178843
синусоїдальна	$y=a+b \cdot \cos(cx+d)$	0.99887787	0.00237045
поліном 5 порядку	$y=a+bx+cx^2+dx^3+ex^4+fx^5$	0.99941713	0.00184555
поліном 6 порядку	$y=a+bx+cx^2+dx^3+ex^4+fx^5+gx^6$	0.99947345	0.00183216
поліном 7 порядку	$y=a+bx+cx^2+dx^3+ex^4+fx^5+gx^6+hx^7$	0.99957402	0.00172841
<b>Крива 7</b>			
лінійна	$y=a+bx$	0.96955477	0.00941179
квадратична	$y=a+bx+cx^2$	0.99895240	0.00181652
поліном 3 порядку	$y=a+bx+cx^2+dx^3$	0.99951479	0.00127893
поліном 4 порядку	$y=a+bx+cx^2+dx^3+ex^4$	0.99968490	0,00107033
синусоїдальна	$y=a+b \cdot \cos(cx+d)$	0.99956429	0.00121280
поліном 5 порядку	$y=a+bx+cx^2+dx^3+ex^4+fx^5$	0.99972949	0.00103221
поліном 6 порядку	$y=a+bx+cx^2+dx^3+ex^4+fx^5+gx^6$	0.99980347	0.00091897
поліном 7 порядку	$y=a+bx+cx^2+dx^3+ex^4+fx^5+gx^6+hx^7$	0.99984705	0.00085027



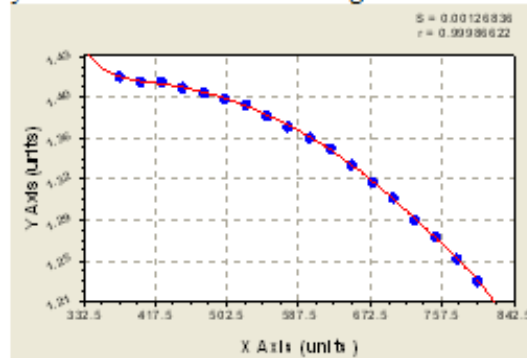
Синусоїдальна  
 $y=a+b \cdot \cos(cx+d)$



поліном 6 порядку  
 $y=a+bx+cx^2+dx^3+ex^4+fx^5+gx^6$



поліном 5 порядку  
 $y=a+bx+cx^2+dx^3+ex^4+fx^5$



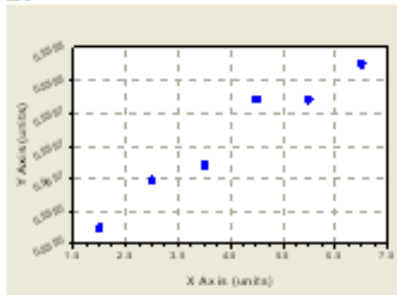
поліном 7 порядку  
 $y=a+bx+cx^2+dx^3+ex^4+fx^5+gx^6+hx^7$

Рисунок 3 – Приклади вікон програмного середовища Curve Expert для інформаційних моделей Sinusoidal Fit та Polynomial Fit

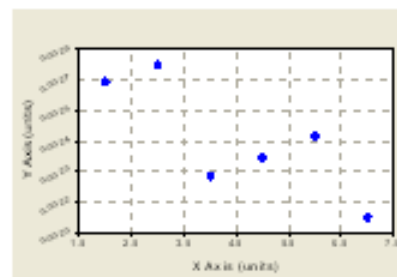
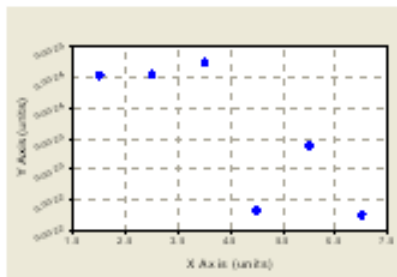
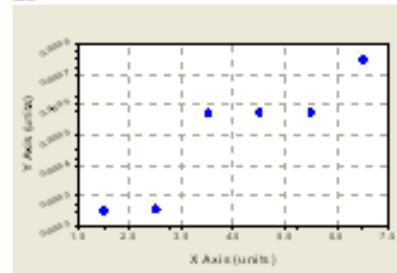
**Таблиця 2 – Результати обчислення критерію  $r/S$  для вибору типу моделі  $E = f(Q_{np})$**

Тип моделі \ Номер кривої	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7
Лінійна	2.84	47.3	53.60	62.04	77.68	79.79	103.01
Квадратична	41.95	308.87	366.98	742.33	400.89	556.72	549.93
поліном 3 порядку	412.15	298.27	356.33	733.14	401.21	557.67	934.02
поліном 4 порядку	408.98	324.80	438.79	839.71	426.96	558.82	558.82
синусоїдальна	483.38	250.67	327.67	483.38	332.81	421.39	824.17
поліном 5 порядку	809.26	321.48	422.86	809.26	429.24	541.54	968.54
поліном 6 порядку	778.20	324.00	405.394	778.20	410.67	545.53	1088.04
поліном 7 порядку	788.29	313.80	479.89	788.35	548.15	578.32	1176.01

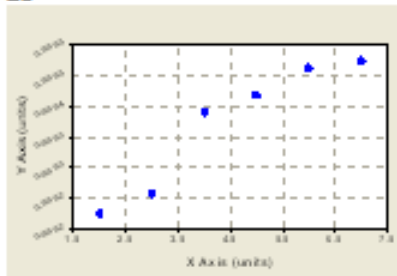
L1



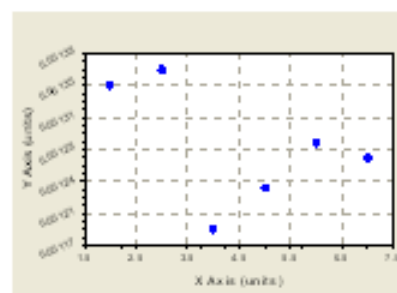
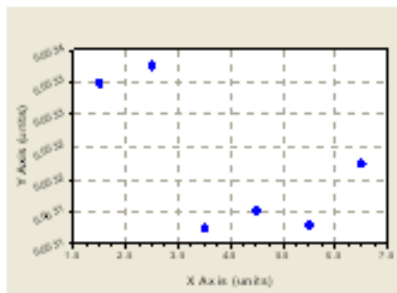
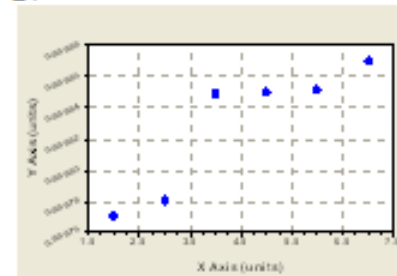
L3



L2

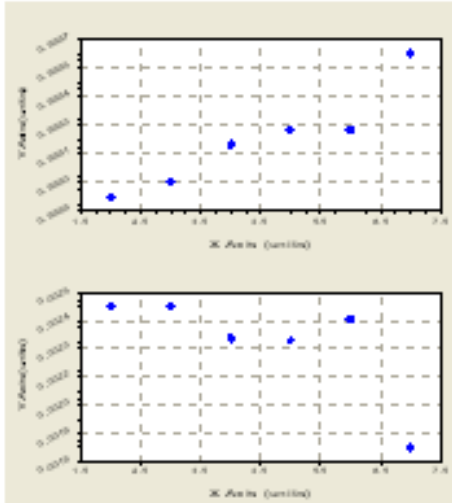


L4

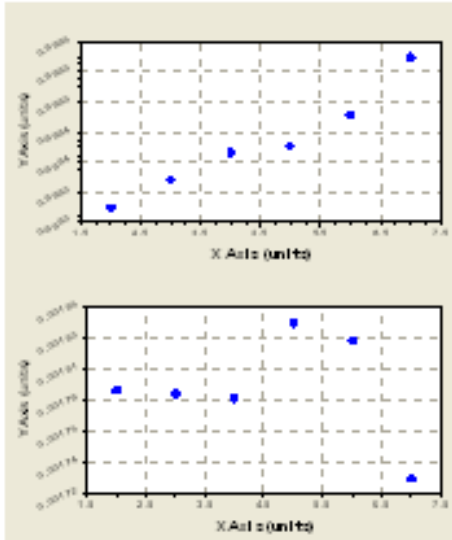


**Рисунок 4 – Вікна програмного середовища Curve Expert для коефіцієнтів кореляції  $r$  і стандартних похибок  $S$  для 1÷4 характеристик  $E = f(Q_{np})$  залежно від порядку поліномів 2÷7**

L5



L6



L7

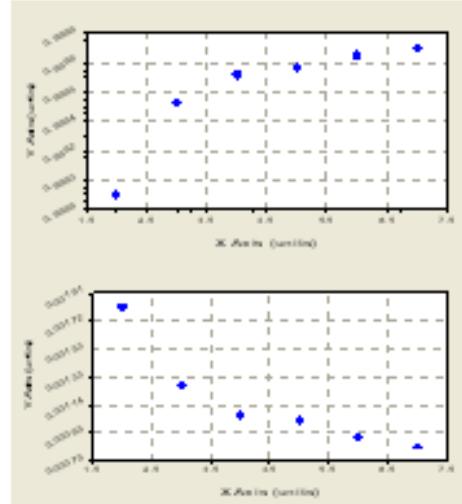


Рисунок 5 – Вікна програмного середовища Curve Expert для коефіцієнтів кореляції  $r$  і стандартних похибок  $S$  для 1÷4 характеристик  $E = f(Q_{np})$  залежно від порядку поліномів 2÷7

Обчислюється приведена витрата  $Q_{np}$ . Далі за вимірними параметрами ГПА визначається приведений ступінь підвищення тиску  $E_{np}$ , яка відповідає приведеним параметрам газу за формулою (12).

Далі складається система рівнянь, яка містить залежності приведенного ступеня підвищення тиску і приведенної витрати для кожного із  $n$  режимів роботи ГПА у вигляді поліномів  $n$ -го порядку із невідомими коефіцієнтами:

$$E_{np1} = A + A_1 Q_{np1} + A_2 Q_{np1}^2 + A_3 Q_{np1}^3 + \dots + A_7 Q_{np1}^7, \quad (17)$$

$$E_{np2} = A + A_1 Q_{np2} + A_2 Q_{np2}^2 + A_3 Q_{np2}^3 + \dots + A_7 Q_{np2}^7, \quad (18)$$

$$E_{np3} = A + A_1 Q_{np3} + A_2 Q_{np3}^2 + A_3 Q_{np3}^3 + \dots + A_7 Q_{np3}^7, \quad (19)$$

$$\dots$$

$$E_{np7} = A + A_1 Q_{np7} + A_2 Q_{np7}^2 + A_3 Q_{np7}^3 + \dots + A_7 Q_{np7}^7. \quad (20)$$

У результаті розв'язання цієї системи рівнянь визначаються коефіцієнти  $A, A_1 \div A_7$ . На основі рівняння (12) і рівняння

$$E_{np} = A + A_1 Q_{np} + A_2 Q_{np}^2 + A_3 Q_{np}^3 + \dots + A_7 Q_{np}^7 \quad (21)$$

будується крива реальної приведенної характеристики нагнітача  $E = f(Q_{np})$ , а після підстановки значень  $(n/n_{ном})_{np} = 1,1; 1,05; 1; 0,95; 0,9; 0,85; 0,8; 0,75; 0,7$  будуються криві реальних приведених характеристик відцентрових нагнітачів газу.

Розрахунки та побудова кривих реальної приведенної характеристики проведено в програмному середовищі MathCad для відцентрового нагнітача Н-370-14-1.

Для розглянутого прикладу коефіцієнти моделі дорівнюють:



L4:

$$A = 32.088; A_1 = -0.387; A_2 = 0.002;$$

$$A_3 = -6.08 \cdot 10^{-6}; A_4 = 1.06 \cdot 10^{-8};$$

$$A_5 = -1.097 \cdot 10^{-11}; A_6 = 6.25 \cdot 10^{-15};$$

$$A_7 = -1.509 \cdot 10^{-18}$$

L5:

$$A = 113.172; A_1 = -1.431;$$

$$A_2 = 0.008; A_3 = -2.305 \cdot 10^{-5};$$

$$A_4 = 4.063 \cdot 10^{-8}; A_5 = -4.246 \cdot 10^{-11};$$

$$A_6 = 2.436 \cdot 10^{-14}; A_7 = -5.92 \cdot 10^{-18}$$

L6:

$$A = -44.113; A_1 = 0.594;$$

$$A_2 = -0.003; A_3 = 9.991 \cdot 10^{-6};$$

$$A_4 = -1.799 \cdot 10^{-8}; A_5 = 1.92 \cdot 10^{-11};$$

$$A_6 = -1.124 \cdot 10^{-14}; A_7 = 2.786 \cdot 10^{-18}$$

Для автоматизації процесу визначення приведених витрато-напірних характеристик ВН розроблено алгоритм програми побудови приведених характеристик (рис. 6).

Нижче подано опис алгоритму:

**Блок 2.** Вводяться такі дані від давачів, встановлених на ГПА:

- тиск на вході в ГПА -  $P_{вх}$ ;
- тиск на виході в ГПА -  $P_{вих}$ ;
- перепад тиску на всмоктуючому конфузори -  $\Delta P_k$ ;
- температура газу на вході в нагнітач -  $T_{вх}$ ;
- фактична частота обертання ротора нагнітача -  $n$ ;

Ці дані зчитуються з давачів, встановлених на ГПА. Параметри  $P_{вх}$ ,  $n$ ,  $\Delta P_k$  зчитуються для кожного з заданих режимів роботи ГПА.

**Блок 3.** Введення даних нагнітача:

1. Параметри нагнітача:

- номінальна швидкість обертання ротора нагнітача -  $n_{ном}$ ;
- коефіцієнт витрати -  $A$ ; обчислюється за результатами тарування камери згоряння з допомогою витрато-мірної діаграми на випробувальному стенді (однотипні нагнітачі мають однакові значення коефіцієнта  $A$ );
- $l$  - поправка на стиснення газу в камері, обчислюється за результатами тарування камери згоряння;

2. Приведені характеристики:

- приведений коефіцієнт стисливості -  $z_{np}$ ;
- приведена газова стала -  $R_{np}$ ;
- приведена температура -  $T_{np}$ .

3. Дані лабораторії:

- атмосферний тиск -  $P_a$ ;
- густина газу -  $\rho$ ;
- коефіцієнт стисливості -  $z$ .

**Блок 4.** Обчислення приведеного ступеня підвищення тиску відцентрового нагнітача  $E_{np}$  для кожного із заданих режимів роботи ГПА.

**Блок 5.** Визначення приведеної витрати  $Q_{np}$  для кожного із заданих режимів роботи ГПА.

**Блок 6.** Складання системи рівнянь, яка містить залежності приведеного ступеня підвищення тиску і приведеної витрати для кожного із заданих режимів роботи ГПА у вигляді поліномів із невідомими коефіцієнтами.

**Блок 7.** Визначення коефіцієнтів  $A_0 \div A_j$  системи рівнянь.

**Блок 8.** Побудова кривих реальних наведених характеристик відцентрового нагнітача газу при значеннях  $(n/n_{ном})_{пр.} = 1,1; 1,05; 1; 0,95; 0,9; 0,85; 0,8; 0,75; 0,7$ .

**Висновок.** Удосконалено технологію визначення приведених характеристик ВН, яка впроваджена в системі автоматичного керування ГПА дотискувальної компресорної станції підземного сховища газу "Більче-Волиця". Досвід експлуатації довів ефективність запропонованого методу, що забезпечує підвищення точності і вірогідності контролю технічного стану відцентрового нагнітача газоперекачувальних агрегатів компресорних станцій.

### Література

1 Баранник Н.Г. Выбор программных средств для разработки распределенных информационных систем в газотранспортной промышленности / Н.Г. Баранник, И.Н. Богаенко, С.Г. Гиренко, Г.С. Коденский, В.Л. Вялов // Вісник Технологічного університету Поділля. – 2002. – № 3. – С.12-15.

2 Пат. 52128А Україна. Спосіб захисту компресора від помпажу / Гиренко С.Г., Спічечников Ю.М., Бобков В.Ю. – №2002021583; заявл.26.02.2002; опубл.16.12.2002, Бюл.№12. – 3 с.

3 Пат. 89302 Україна. Спосіб захисту компресора від помпажу / Беккер М.В., Шимко Р.Я., Семенцов Г.Н., Бляут Ю.Є., Гиренко С.Г., Петеш М.О., Сукач О.В., Репета А.Ф. – №а200807810; заяв. 09.06.2008; опубл. 25.11.2009, Бюл. № 22. – 10 с.

4 Гиренко С.Г. Антипомпажне регулювання та захист газоперекачувального агрегату докачуючої компресорної станції підземного сховища газу / С.Г. Гиренко // Автоматика-2008: XV міжнарод. науч.-практ. конф.: тезиси докл. – Одесса: ОНМА. – 2008. – С.741-745.

5 Казакевич В. В. Автоколебания (помпаж) в компрессорах / В. В. Казакевич. – М.: Машиностроение, 1974. – 264 с.

6 Семенцов Г.Н. Показник нестационарності для визначення моменту входу робочої точки нагнітача в зону помпажу / Г.Н. Семенцов, С.Г. Гиренко // Вимірювання витрати та кількості газу: збірник тез доповідей 5<sup>ої</sup> всеукраїнської науково-технічної конференції. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2007. – С.52.

7 Гиренко С.Г. Методи виявлення сигналів з випадковою амплітудою для попередження помпажних явищ компресорів докачуючих компресорних станцій / С.Г. Гиренко // Сов-

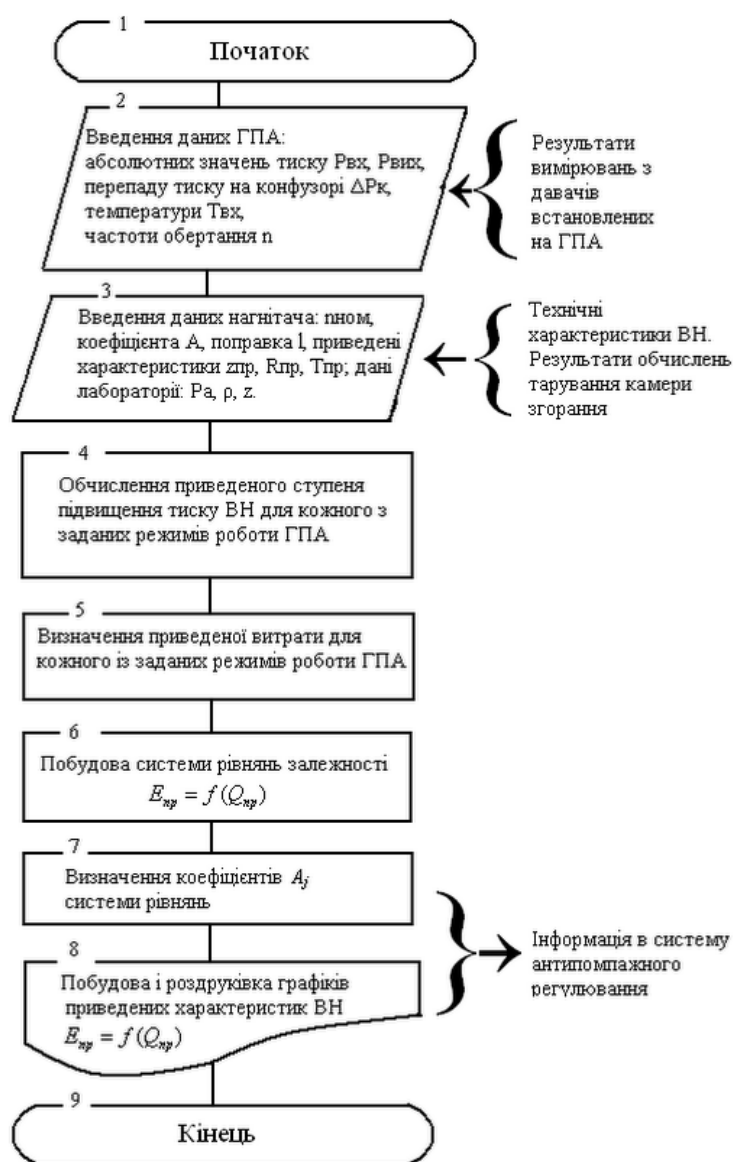


Рисунок 6 – Блок-схема алгоритму програми побудови графіків приведених витрато-напірних характеристик ВН ГПА ДКС ПГС

ременные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании-2007: сб. науч. трудов по материалам междунар. науч-практ.конф. – Том 5, технические науки, физика, математика. – Одесса: Черноморье. – 2007. – С.26-30.

8 Гіренко С.Г. Нові методи антипомпажного регулювання відцентрових нагнітачів газоперекачувальних агрегатів / С.Г. Гіренко // Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития 2007: сб. науч. трудов по материалам междунар. науч-практ.конф. – Одесса: Черноморье. – 2007. – С.18-19.

9 Гіренко С.Г. Вимоги до антипомпажного регулювання відцентрових нагнітачів газоперекачувальних агрегатів компресорного цеху підземного сховища газу / С.Г. Гіренко // Vedeck potencial sveta: material IV mezinar. ved.-prakt. conf. – Praha: Publishing Nause “Education and Science” s. r. o. – 2007. – Stran.7-11.

10 Цыпкин Я.З. Оптимальная идентификация динамических объектов / Я.З. Цыпкин // Измерения, контроль, автоматизация. – 1983. – Вып. 3(47). – С. 47-60.

11 Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя / Л. Льюнг; пер. с англ. А.С. Мандела, А.В. Назина; под ред. Я.З. Цыпкина. – М.: Наука, 1991. – 432 с.

12 Трубопроводный транспорт газа / М.П.Ковалко, В.Я.Грудз, В.Б.Михалків, [та ін.]; за редакцією М.П.Ковалка. – Київ: Агентство з раціонального використання енергії та екології, 2002. – 600 с.

Стаття надійшла до редакційної колегії  
19.03.12

Рекомендована до друку професором  
Г. Н. Семенцовим