

КОНТРОЛЬ, АВТОМАТИКА ТА ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

УДК 62-503.56:621.6-52

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНОГО АГРЕГАТУ ЯК ЕЛЕМЕНТА СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ КОМПРИМУВАННЯ ПРИРОДНОГО ГАЗУ

¹М.І.Горбійчук, ¹М.І.Козуляк, ²О.Б.Василенко

¹ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська 15, тел. (0342) 504521
e-mail: gorb@nimg.edu.ua

²Науково-дослідний і проектний інститут ВАТ «Укрнафта»,
76019, м. Івано-Франківськ, вул. Північний бульвар, 2, тел. (0342) 776140,
e-mail: felix122@rambler.ru

Проведено обчислення параметрів моделі і оцінювання її точності шляхом порівняння експериментальних та обчислених значень. Досліджено динаміку газоперекачувального агрегату.

Отримано структурну схему ГПА як елемента системи адаптивного автоматичного керування процесом компримування природного газу. Результати дають змогу отримати лінеаризовану математичну модель динаміки ГПА, що використовуватиметься для синтезу адаптивної системи автоматичного керування процесом компримування природного газу.

Ключові слова: газоперекачувальний агрегат, система автоматичного керування, газопровід, динаміка газоперекачувального агрегату, математична модель, передавальна функція.

Вычислены параметры модели и проведена оценка ее точности путем сравнения экспериментальных и вычисленных значений. Исследована динамика газоперекачивающего агрегата.

Получена структурная схема ГПА как элемента системы адаптивного автоматического управления процессом компримирования природного газа. Результаты позволяют получить линейризованную математическую модель динамики ГПА, которая будет использована для синтеза адаптивной системы автоматического управления процессом компримирования природного газа.

Ключевые слова: газоперекачивающий агрегат, система автоматического управления, газопровод, динамика газоперекачивающего агрегата, математическая модель, передаточная функция.

The calculation of model parameters and estimation of its exactness is conducted by comparison of experimental and calculated values. Research of gas pumping unit dynamics is conducted.

The flow diagram of GPU is got as an element of the adaptive automatic control system of natural gas compression process. Results enable to get the linearized mathematical model of gas pumping unit dynamics, which will be used for the synthesis of the adaptive automatic control system of natural gas compression process.

Keywords: gas pumping unit, automatic control system, gas pipeline, gas pumping unit dynamics, mathematical model, transmission function.

Створення сучасних автоматичних систем оптимального і адаптивного керування процесом компримування природного газу вимагає знання динамічних властивостей газоперекачувального агрегату (ГПА) як елемента такої системи. Попри цілий ряд публікацій, які присвячені даній задачі, актуальним залишається питання створення моделі ГПА, яка була б придатною як для цілей управління, так і для поточної ідентифікації її параметрів.

У роботі [1] описане рівняння руху ротора для найпростішої схеми, яке включає турбіну і

компресор природного газу. Для створення моделі ГПА враховуються усі характеристики обладнання, так розглядаються алгоритми ідентифікації реальних газодинамічних характеристик газотурбінних установок та відцентрових нагнітачів компресорних станцій [2]. Логічна модель ГПА згідно [3] дозволяє якісно виділити характерні несправності.

Аналіз публікацій показав, що недоліком відомих моделей є складність визначення параметрів, які входять в ці моделі, а також неврахування динамічних властивостей приле-

лих до компресорних станцій ділянок газопроводів [3, 4].

Математичну модель ГПА запишемо у такому вигляді:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{ГТД} - M_{ВЦН}, \quad (1)$$

де: J – момент інерції приведений до валу ГПА;

ω – кутова швидкість обертання валу ГПА;

$M_{ГТД}$ – момент на валу газотурбінного двигуна (ГТД);

$M_{ВЦН}$ – момент на валу відцентрового нагнітача (ВЦН) природного газу.

Момент на валу ГТД визначимо за відомою формулою:

$$M_{ГТД} = \frac{N_e}{\omega}. \quad (2)$$

Згідно з [5] потужність ГТД обчислюється за формулою

$$N_e = \frac{Q_{мен}}{\eta_e}, \quad (3)$$

де: $Q_{мен}$ – фактична витрата тепла;

η_e – коефіцієнт корисної дії ГТД;

Фактичну витрату тепла визначають за формулою

$$Q_{мен} = Q_{nc} H_n, \quad (4)$$

де: Q_{nc} – об'ємна витрата паливного газу, m^3/c ;

H_n – нижня теплота згоряння паливного газу, $MДж/m^3$.

На компресорній станції (КС) Долинського лінійного управління магістральними газопроводами установлені ГПА типу ГПА-Ц1-16С/76-1,44, для яких [5]

$$\eta_e = K_\eta \left(1 - \frac{i_5 - i_1}{i_4 - i_1} \right), \quad (5)$$

де: $K_\eta = \eta_{кз} \eta_{м,зму} K_\xi$;

$\eta_{кз}$ – коефіцієнт повноти згоряння палива у камері згоряння;

$\eta_{м,зму}$ – коефіцієнт, що враховує всі теплотехнічні втрати потужності з врахуванням витрат на роботу приводів допоміжних механізмів, у проточній частині ГТД;

K_ξ – поправочний коефіцієнт, що враховує незворотні відбори повітря за компресором (відбори на власні потреби ГПА, КС), можливі витоки у лабіринтових ущільненнях;

$i_1 = c_{p1} t_1$ – ентальпія повітря на вході ГТД, $кДж/кг$;

c_{p1} – теплоємність повітря ($c_{p1}=1,02$ $кДж/(кг\cdot C)$);

t_1 – температура повітря на вході у компресор ГТД;

$$t_j = 1,47 + 99,52 \cdot \left(\frac{t_j}{100} \right) + 1,21 \cdot \left(\frac{t_j}{100} \right)^2 -$$

ентальпія газів, $кДж/кг$; індексом j позначений відповідний переріз проточної частини ГТД, для якого ведеться розрахунок: $j = 4$ – на вході силової турбіни; $j = 5$ – на вихлопі ГПА;

Числові значення коефіцієнтів [5] для ГПА-Ц1-16С/76-1,44: $\eta_{кз}=0,985-0,99$;

$\eta_{м,зму}=0,99-0,992$; $K_\xi=0,987-0,992$. Для задачі, що розглядається, достатньо взяти середні значення наведених коефіцієнтів. Тоді $K_\eta = 0,9683$.

Момент $M_{ВЦН}$ визначають за формулою, аналогічною (2)

$$M_{ВЦН} = \frac{N_i}{\omega}. \quad (6)$$

Внутрішню потужність ВЦН N_i ($МВт$) визначають за формулою [5]

$$N_i = 10^{-3} \cdot \Delta i_n G_n, \quad (7)$$

де: $\Delta i_n = i_{2n} - i_{1n}$; i_{1n} , i_{2n} – питомі ентальпії на вході і виході ВЦН, що обчислюються у відповідності зі співвідношенням

$$i = i_0 - RT_{кр} \delta i, \quad (8)$$

$i_0 = (2,6R + 0,149) \cdot (t + 273) + 1,225 \cdot 10^{-3} (t + 273)^2$ – питома ентальпія ідеального газу, $кДж/кг$;

$$R = \frac{0,346}{\Lambda} - \text{газова стала};$$

$$\Lambda = \frac{\rho_{cm}}{1,205} - \text{відносна густина газу за повітрям};$$

ρ_{cm} – густина природного газу за стандартних умов;

$T_{кр} = 99,8 + 162,8\Lambda$ – критична температура, $^{\circ}K$;

$$\delta i = \tau \left(c \frac{\pi}{Z\tau} + d \left(\frac{\pi}{Z\tau} \right)^2 - Z + 1 \right) - \text{поправка}$$

до питомої ентальпії i_0 , що враховує відхилення реального газу від ідеального;

$$\tau = \frac{t + 273}{T_{кр}} - \text{приведена температура};$$

$$c = \frac{0,3468}{\tau} + \frac{0,3564}{\tau^2};$$

$$d = 0,5 \left(\frac{0,0273}{\tau} - \frac{0,117}{\tau^3} \right);$$

Z – коефіцієнт стисливості газу (визначають з модифікованого рівняння стану Бенедикта-Вебба-Рабіна (BWR) [6]);

$$Z^3 - Z^2 - aZ - b = 0, \quad (9)$$

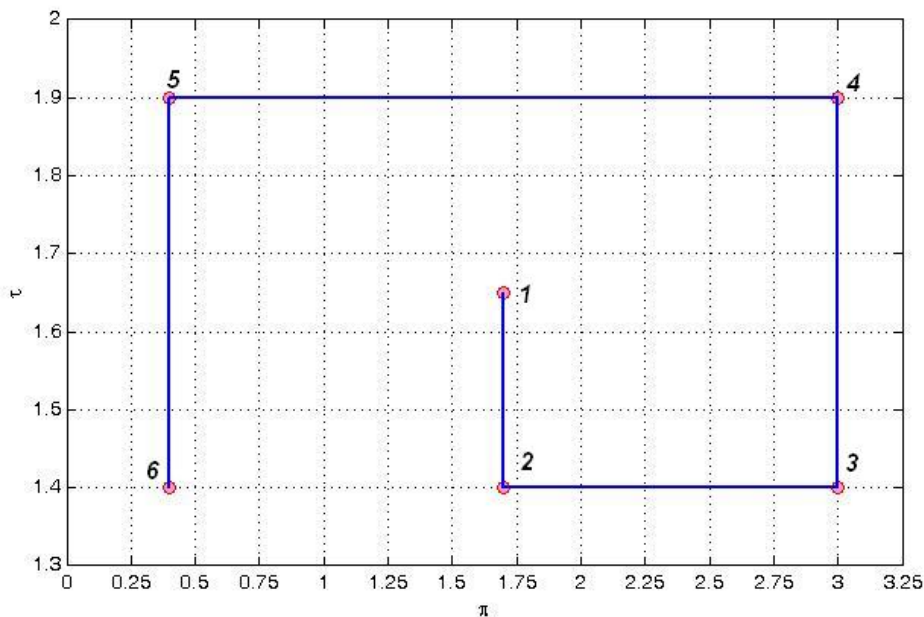


Рисунок 1 – План експерименту для моделі (10)

$$a = \left(\frac{0,1237}{\tau} - \frac{0,3468}{\tau^2} - \frac{0,1188}{\tau^4} \right) \pi;$$

$$b = \left(\frac{0,0291}{\tau^2} - \frac{0,0273}{\tau^3} + \frac{0,039}{\tau^5} \right) \pi^2;$$

$$\pi = \frac{P + 1,33 \cdot 10^{-5} P_a}{P_{кр}} - \text{приведений тиск};$$

P – надлишковий тиск на вході (виході) ВЦН, МПа;

P_a – атмосферний тиск, мм. рт. ст.;

$P_{кр} = 4,67 - 0,1A$ – критичний тиск, МПа.

У наведених формулах (7), (8) температура t приймає значення t_{1n} , якщо обчислюється ентальпія i_{1n} і t_{2n} при обчисленні i_{2n} .

Значення коефіцієнта стисливості газу визначають для параметрів входу і виходу ВЦН, підставляючи у відповідні формули замість P і t їх значення P_{1n} , P_{2n} і i_{1n} , t_{2n} .

Визначення Z за рівнянням (9) є непродуктивним для моделі, яка описує динаміку ГТД. Тому було прийнято рішення значення коефіцієнтів стисливості газу, кожне із яких обчислюються як дійсний додатній корінь рівняння (9), апроксимувати поліномом

$$y = \sum_{t=1}^N a_t \prod_{k=1}^r u_k^{\alpha_{kt}}, \quad \sum_{k=1}^r \alpha_{kt} \leq m \quad (10)$$

де: a_t – коефіцієнти моделі;

$u_k, k = \overline{1, r}$ – набір змінних моделі;

α_{kt} – степені аргументів, які приймають значення 0, 1, ..., m і задовольняють вказаному обмеженню;

r – кількість аргументів моделі (вхідних змінних).

Число N членів полінома (10) визначається за такою формулою:

$$N = \frac{(m+r)!}{r!m!}.$$

Був вибраний поліном третього степеня $m = 3$. Для якого, був складений план експерименту, який зображений на рис. 1; загальна кількість «експериментальних» точок $M = 41$. У кожній із M точок обчислювались значення $Z_i, i = \overline{1, M}$ як розв'язок рівняння (10). Отримані значення величин Z_i приймалися як результати «експерименту», що апроксимувались поліномом (10).

Параметри моделі (10) обчислювались за методом найменших квадратів, у відповідності з яким [7]

$$\bar{a} = CF^T \bar{Z}, \quad (11)$$

де: $C = (F^T F)^{-1}$ – дисперсійна матриця;

F – матриця плану експерименту;

\bar{Z} – вектор результатів обчислень коефіцієнта стисливості природного газу $Z_{e,i}$ у відповідності з рівнянням (9).

Після обчислення параметрів моделі (10) за формулою (11) була оцінена точність отриманої моделі шляхом порівняння «експериментальних» і обчислених значень $Z_{e,i}$:

$$\delta Z = \max_{i \in M_e} \frac{|Z_{e,i} - Z_i|}{Z_{e,i}} \cdot 100\%,$$

де M_e – кількість точок, в яких здійснювались обчислення значень $Z_{e,i}$ та Z_i .

Результати такої оцінки відтворює рис. 2, де суцільній лінії відповідають значення $Z_{e,i}$,

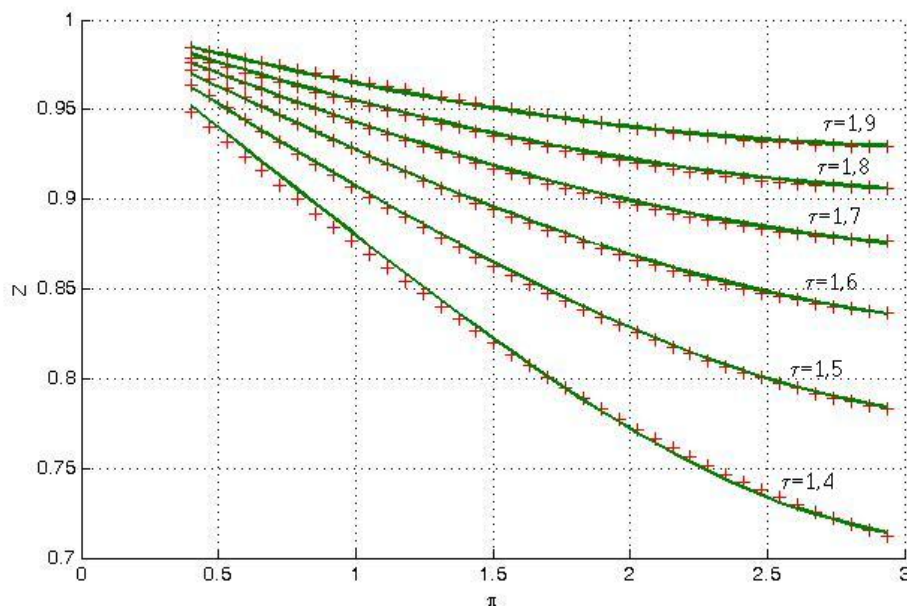


Рисунок 2 – Апроксимація залежності $Z = f_z(\pi, \tau)$ поліномом третього степеня

які обчислювались у відповідності з рівнянням (9), а «+» позначені значення Z_i , що отримані у результаті обчислень за поліномом (10). Максимальна похибка апроксимації становить: $\delta Z = 0,57\%$, що є цілком прийнятною для задачі, яка розглядається.

Таким чином, якщо у рівняння (1) підставити значення моментів $M_{ГТД}$, $M_{ВЦН}$, які визначаються формулами (2)-(8), то отримаємо математичну модель динаміки ГТД

$$J \frac{d\varphi}{dt} = M_{ГТД}(Q_{p2}, t_1, t_4, t_5, \omega) - M_{ВЦН}(G_n, P_{1n}, P_{2n}, t_{1n}, t_{2n}, \omega), \quad (12)$$

У роботі [8] отримана залежність степеня підвищення тиску природного газу ε від зведеної частоти обертання ротора n_{np} та об'ємної продуктивності ВЦН, віднесеної до одного радіана q

$$\varepsilon = z\tau_t \left(\frac{r_1}{2r_0} + \sqrt{0.25 \left(\frac{r_1}{r_0} \right)^2 + \frac{r_2}{r_0}} \right), \quad (13)$$

де: $r_0 = \frac{X_3}{q} + X_4$; $r_1 = (z\tau_t - 1) \frac{A}{n_{II}^2} - X_5 - qX_1$;

$$r_2 = qX_2$$
; $q = \frac{Q_n}{\omega}$; $z = \frac{Z_{2n}}{Z_{1n}}$; $\tau_t = \frac{T_{n1}}{T_{n2}}$;

$n_{II} = \frac{n}{n_{ном}} \sqrt{\frac{A_0}{Z_{1n}RT_{1n}}}$ – зведена частота обертання робочого колеса;

$A = \frac{A_0}{\omega_{ном}^2}$; $A_0 = z_0 R_0 T_0$; z_0, R_0, T_0 – параметри зведення;

$n_{ном}$ – номінальна частота обертання робочого колеса;

$\omega_{ном} = 2\pi n_{ном}$ – номінальна кутова швидкість обертання робочого колеса;

Q_n – об'ємна продуктивність ВЦН;

X_1, X_2, X_3, X_4, X_5 – параметри моделі (13).

Параметри моделі $X_i, i=1,2,\dots,5$ можна знайти як результат розв'язання задачі

$$J(\bar{X}) = \min_{\bar{X}} \sum_i (\varepsilon_{e,i} - \varepsilon_i(\bar{X}, q_i, n_{II,i}))^2, \quad (14)$$

де: \bar{X} – вектор параметрів моделі (13);

$\varepsilon_{e,i}$ – експериментальні значення степеня підвищення тиску природного газу;

$\varepsilon_i(\bar{X}, q_i, n_{II,i})$ – значення степеня підвищення тиску природного газу, які обчислені у відповідності з формулою (13).

Аналіз задачі (14) засвідчив, що вона є суттєво нелінійною, і застосування до неї відомих методів оптимізації [9, 10] не дає задовільних результатів у плані точності моделі (14). Тому було прийнято рішення залежність $\varepsilon(\bar{X}, q, n_{II})$ описати регресійною моделлю (10), у якій $u_1 = q$ і $u_2 = n_{II}$.

Недоліком регресійних моделей є те, що структура моделі вибирається довільною. Коефіцієнти моделі розраховуються за методом найменших квадратів (МНК). Такий критерій апроксимації результатів експерименту поліноміальною залежністю (регресійною моделлю) носить назву [11] внутрішнього критерію. Вибір внутрішнього критерію призводить до хибного результату: чим складніша модель – тим вона точніша. Складність поліноміальної моделі оцінюється числом і максимальним сте-

пенем доданків. Чим більше число членів моделі, тим вона точніша. Отримана у такий спосіб математична модель може досить точно описувати табличні дані експерименту, але вона може дати досить хибне уявлення як про структуру моделі, так і про властивості об'єкта. Це пояснюється неточністю вихідних експериментальних даних, оскільки на вимірювані значення технологічних параметрів накладається перешкода, яка у значній мірі може спотворювати шукану залежність між виходом і входом об'єкта.

Альтернативою такому підходу до побудови математичних моделей є індуктивний метод моделювання [12], який заснований на принципі самоорганізації і мінімального обсягу апріорної інформації про об'єкт. На відміну від методу регресійного аналізу, індуктивний метод самоорганізації моделей ґрунтується на зовнішніх критеріях, тобто при його визначенні використовуються нова інформація – експериментальні дані, які не використовувались для синтезу моделі. На відміну від індуктивного методу, регресійний метод використовує внутрішній критерій, який визначається на тих же даних, що й коефіцієнти моделі. У відповідності з теоремою Геделя про необхідність зовнішнього доповнення [12] тільки зовнішні критерії дають можливість вибрати єдину модель оптимальної складності. Структура моделі оптимальної складності відповідає мінімуму зовнішнього критерію. Величину мінімального значення критерію – глибину мінімуму можна розглядати як оцінку якості моделювання і надійності моделі [12].

Характерною особливістю індуктивного методу побудови оптимальних моделей є те, що початкова вибірка експериментальних даних розбивається на три множини: множина A – навчальна; множина B – перевірна і множина C – екзаменаційна. Множина A слугує для визначення коефіцієнтів моделей. Вибір моделі оптимальної складності із множини можливих є багатозначною і некоректною задачею [12]. Для того, щоб отримати однозначну модель, додатково формулюють зовнішні критерії як на множині B , так і на множині C . До таких критеріїв відносять [12]: критерій регулярності $\Delta^2(B)$ та критерій зміщення (не протиріччя) моделі n_{zm}^2 .

Критерій регулярності визначає середньоквадратичне відхилення на множині B

$$\Delta^2(B) = \frac{\sum_{i \in N_B} (\varepsilon_{e,i}^{(M_B)} - \varepsilon_i)^2}{\sum_{i \in N_B} \varepsilon_i^2}, \quad (15)$$

де: $\varepsilon_{e,i}^{(M)}$ – експериментальні значення ступені підвищення тиску на множині B ;

ε_i – ступінь підвищення тиску, розрахований за моделлю оптимальної складності;

M_B – кількість елементів (експериментальних точок) множини B .

Критерій зміщення визначають як середньоквадратичне значення відхилень виходів моделей (10) для ε_i^A і ε_i^B , які визначені на множинах A і B для всієї вибірки N

$$n_{zm}^2 = \frac{\sum_{i \in N} (\varepsilon_i^A - \varepsilon_i^B)^2}{\sum_{i \in N} \varepsilon_i^2}. \quad (16)$$

В алгоритмах методу групового урахування аргументів (МГУА) розподіл даних спостережень відбувається так [13]:

критерій регулярності –

$$N_A = 0,7N; N_B = 0,2N; N_C = 0,1N;$$

критерій зміщення –

$$N_A = 0,5N; N_B = 0,4N; N_C = 0,1N.$$

При самоорганізації моделей використовуються деякий генератор моделей-претендентів, який визначає структури різної складності. Самоорганізація (оцінка за критеріями) дає підстави вилучити співвідношення і зв'язки, які є зайвими чи випадковими. Після виключення явно непридатних моделей інші оцінюються за критерієм (15) або (16) і як результат вибирається модель оптимальної складності.

Для побудови моделі $\varepsilon(\bar{X}, q, n_{II})$ оптимальної складності був вибраний критерій зміщення, степінь полінома $m = 4$, а кількість моделей, що підлягали відбору – три.

Обчислення коефіцієнтів часткових моделей здійснювалось за методом найменших квадратів. Для коректного розв'язку такої задачі необхідно [7], щоб матриця Фішера була добре обумовленою. Як свідчать чисельні розрахунки цього можна досягти, якщо як вхідні, так і вихідні величини об'єкта привести до безрозмірного вигляду

$$u_{ij} = \frac{U_{ij} - U_{jmin}}{U_{jmax} - U_{jmin}},$$

$$y_i = \frac{\varepsilon_i - \varepsilon_{min}}{\varepsilon_{max} - \varepsilon_{min}},$$

де: $U_{jmin} = \min_{1 \leq i \leq M} U_{ij}$, $U_{jmax} = \max_{1 \leq i \leq M} U_{ij}$,

$$\varepsilon_{min} = \min_{1 \leq i \leq M} \varepsilon_i, \varepsilon_{max} = \max_{1 \leq i \leq M} \varepsilon_i; i = \overline{1, M}, j = \overline{1, r};$$

M – число експериментальних точок (довжина масиву).

У середовищі MatLab створена програма, за допомогою якої отримана математична модель $\varepsilon(\bar{X}, q, n_{II})$ оптимальної складності

$$y = a_0 + a_1 u_1 u_2 + a_2 u_1^2 u_2 + a_3 u_1^3 u_2 + a_4 u_1^2 u_2^2, \quad (17)$$

де: $a_0 = 0,485581$; $a_1 = -0,0066327$; $a_2 = 2,81078$; $a_3 = 0,525854$; $a_4 = -8,77908$. Результат роботи програми відтворює рис. 3. Зауважимо, що у формулі (17) всі змінні подані у безрозмірних

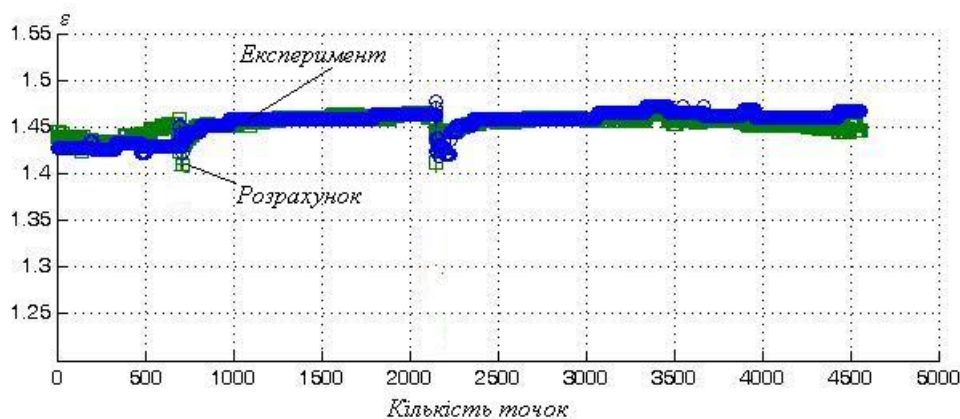


Рисунок 3 – Апроксимація залежності $\varepsilon(\bar{X}, q, n_{II})$ поліномом оптимальної складності

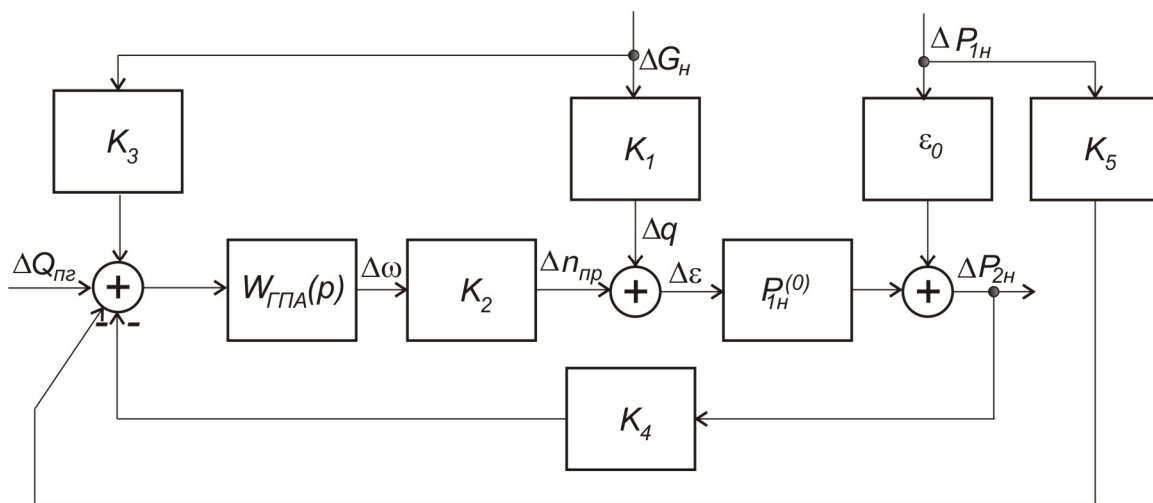


Рисунок 4 – Структурна схема ГПА як елемента системи автоматичного керування процесом компримування природного газу

одиницях. Для переходу до фізичних величин необхідно скористатись такими співвідношеннями:

$$u_1 = \frac{n_{np} - n_{np}^{(min)}}{n_{np}^{(max)} - n_{np}^{(min)}}, \quad u_2 = \frac{q - q_{max}}{q_{max} - q_{min}},$$

$$y = \frac{\varepsilon - \varepsilon_{min}}{\varepsilon_{max} - \varepsilon_{min}}.$$

Отримані результати дають змогу отримати структурну схему ГПА як елемента системи адаптивного автоматичного керування процесом компримування природного газу (рис. 4).

Передавальна функція $W_{ГПА}(p)$, а також коефіцієнти передачі $K_i, i = \overline{1,4}$ (рис. 4) визначаються шляхом лінеаризації [14] залежностей

$$M_{ГТД}(Q_{н2}, t_1, t_4, t_5, \omega),$$

$$M_{ВЦН}(G_n, P_{1н}, P_{2н}, t_{1н}, t_{2н}, \omega),$$

і $P_2 = \varepsilon P_1$ (при незмінному температурному режимі) відносно усталеного (номінального) режиму роботи ГПА.

Таким чином, отримані результати дають змогу отримати лінеаризовану математичну модель динаміки ГПА, яка буде використана для синтезу адаптивної системи автоматичного керування процесом компримування природного газу.

Література

- 1 Арсеньев Л.В. Газотурбинные установки. Конструкции и расчет: справочное пособие / Л.В.Арсеньев, В.Г.Тырышкин. – Л.: Машиностроение, 1978. – 232 с.
- 2 Линецкий И.К. Получение и учёт фактических характеристик оборудования при расчётах режимов компрессорных станций магистральных газопроводов / Линецкий И.К., Лещенко И.Ч., Вертепов А.Г. // Проблемы загальної енергетики. – 1999. – №1. – С. 40-47.
- 3 Семенов А.С. Комплексный анализ работоспособности газоперекачивающих агрегатов на основе прогноза остаточного ресурса: Автореф. дис. канд. техн. наук / Тюменский государственный нефтегазовый университет. – Тюмень, 2004. – 21 с.

4 Слободчиков К. Ю. Метод структурного моделирования системы управления компрессорным цехом // Юбилейная Международная научно-практическая конференция «Теория и практика имитационного моделирования и создания тренажеров»: Сборник статей. – Пенза, 2004.

5 Компресорні станції. Контроль тепло-технічних та екологічних характеристик газоперекачувальних агрегатів: СОУ 60.03-30019801-011:2004. – Офіц. вид. – К.: ДК «Укртрансгаз», 2004. – 117 с.

6 Рид Р. Свойства газов и жидкостей: Справочное пособие / Р. Рид; пер. с англ., 3-е изд. – Л.: Химия, 1982. – 512 с.

7 Ермаков С. М. Математическая теория оптимального эксперимента: учеб. пособие [для студ. высш. учеб. завед.] / С. М. Ермаков, А. А. Жиглявский. – М.: Наука, 1987. – 320 с.

8 Горбійчук М. І. Діагностична модель відцентрового нагнітача природного газу / М. І. Горбійчук, М. І. Когутяк, О. А. Скріпка // Нафтова і газова промисловість. – 2006. - № 2. – С. 36 – 38.

9 Гилл Ф. Практическая оптимизация / Ф. Гилл, У. Мюррей, М. Райт; пер с англ. В. Ю. Лебедева. – М.: Мир, 1984. – 509 с.

10 Рутковская Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. Рутковская, М. Пилинский, Л. Рутковский; пер. с польск. И. Д. Рудинского. – М.: Горячая линия-Телеком, 2004. – 452 с.

11 Ивахненко А. Г. Помехоустойчивость моделирования: монография / А. Г. Ивахненко, В. С. Степашко.– К.: Наукова думка, 1985. – 216 с.

12 Ивахненко А. Г. Индуктивный метод самоорганизации моделей сложных систем: монография / А. Г. Ивахненко – К.: Наукова думка, 1981. – 296 с.

13 Ивахненко А.Г. Справочник по типовым программам моделирования / А. Г. Ивахненко, Ю. В. Коппа, В. С. Степашко и др.; под ред. А. Г. Ивахненко – К.: Техніка, 1980. – 180 с.

14 Справочник по теории автоматического управления / [А.Г.Александров, В.М.Артемьев, В.П.Афанасьев]; под ред. А.А.Красовского. – М.: Наука, 1987. – 712 с.

*Стаття поступила в редакційну колегію
29.07.09*

*Рекомендована до друку професором
В. М. Юрчишиним*