

УДК 622.692

АЛГОРИТМИ І МЕТОДИ ДИСПЕТЧЕРСЬКОГО ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛІННЯ РЕЖИМАМИ МАГІСТРАЛЬНИХ ГАЗОПРОВІДІВ

Д. Ф. Тимків

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу;
76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15;
тел. +380 (342) 4-21-57; e-mail: public@nung.edu.ua*

Розглядається рішення завдань, пов'язаних з оптимізацією режимів роботи МГ, з урахуванням фактичного стану ГПА та стану ЛД на магістральному газопроводі. Існуючі схеми диспетчерського управління МГ умовно розділено на дві системи централізовану і децентралізовану. Друга схема диспетчерського управління має певні переваги по стійкості рішення і надійності реалізації, пов'язаної з тим, що для першого виду управління необхідна дуже складна нелінійна динамічна модель, а також великий обсяг диспетчерської інформації.

Ключові слова: *оптимізація режимів, схеми управління, алгоритми, методи.*

Диспетчерське управління режимами роботи магістральних газопроводів (МГ) має ієрархічну структуру, що складається з декількох ступенів [3]. До задач планування та управління МГ належать:

- завдання перспективного планування;
- завдання поточного планування;
- задачі оптимального управління.

В даний час є ряд методик вирішення завдань диспетчерського управління, що базуються на різних моделях управління [1, 2, 3]. Особливістю розробленого підходу є побудова схем диспетчерського управління з використанням регресійних рівнянь для опису нестационарного режиму роботи МГ.

Ієрархічна схема диспетчерського управління МГ по виду передачі інформації можна представити у вигляді, наведеному на рис. 1, яка включає:

- 1 – магістральний газопровід (складний технологічний об'єкт);
- 2 – пристрій збору та формування диспетчерської інформації;
- 3 – пристрій передачі диспетчерської інформації в ЦДУ;
- 4 – пристрій зберігання диспетчерської інформації;
- 5 – математичне забезпечення МГ (модель управління, методи оптимізації і т.д.);
- 6 – засіб диспетчерського відображення та передачі інформації про оптимальне управління з ЦДУ;

7 – засіб диспетчерської реалізації оптимальних управлінь на КС.

Процес диспетчерського керування режимами роботи МГ, незалежно від схем подання та розбиття МГ на окремі ділянки функціонування, включає реалізацію наступної послідовності дій:

1. Отримання диспетчерської інформації про режим експлуатації МГ.

2. Обробка диспетчерської інформації, побудова моделі функціонування МГ.

3. Прийняття рішення про зміну режиму роботи МГ і вироблення диспетчером закону керування.

4. Обробка диспетчером зміни режиму роботи МГ відповідно до закону управління.

На рис. 2 наведена блок-схема диспетчерського управління МГ, пунктирною лінією тут окреслено блок диспетчерського управління. Блок диспетчерського управління в цій схемі включений в лінію зворотного зв'язку, це є основним принципом управління, який використовується в роботі. Управління за цим принципом здійснюється за двома схемами: за відхиленням і за збуренням [3,4].

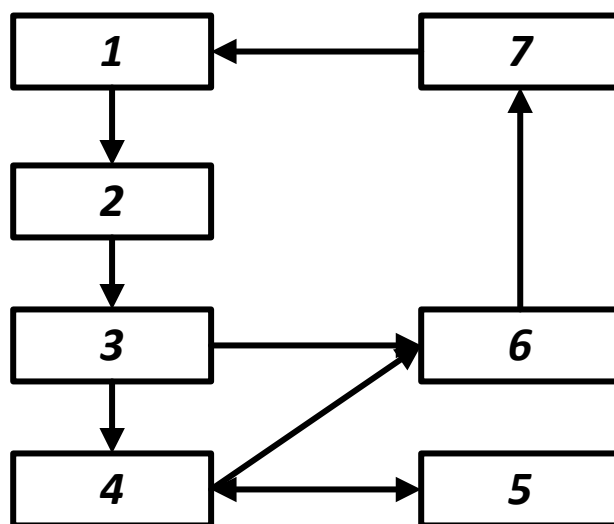


Рис. 1. Ієрархічна структура схеми диспетчерського управління МГ згідно проходження інформації

Основний недолік цих схем управління полягає в детермінованості моделі МГ. Оскільки МГ належить до класу нестационарних об'єктів, то модель необхідно уточнювати, для цього в схемі диспетчерського управління необхідно включити ідентифікатор. На рис. 3 наведена блок-схема диспетчерського управління МГ з використанням ідентифікатора в ланцюзі зворотного зв'язку, в цій схемі Y_0 – задане значення для вихідного показника режиму МГ. Ідентифікатор визначає структуру і пара-

метри моделі МГ або оператор перетворення A_t . В цьому блоці здійснюється безперервне його уточнення. На рис. 4 наведена схема диспетчерського управління МГ за збуренням і за відхиленням в адаптивному режимі.

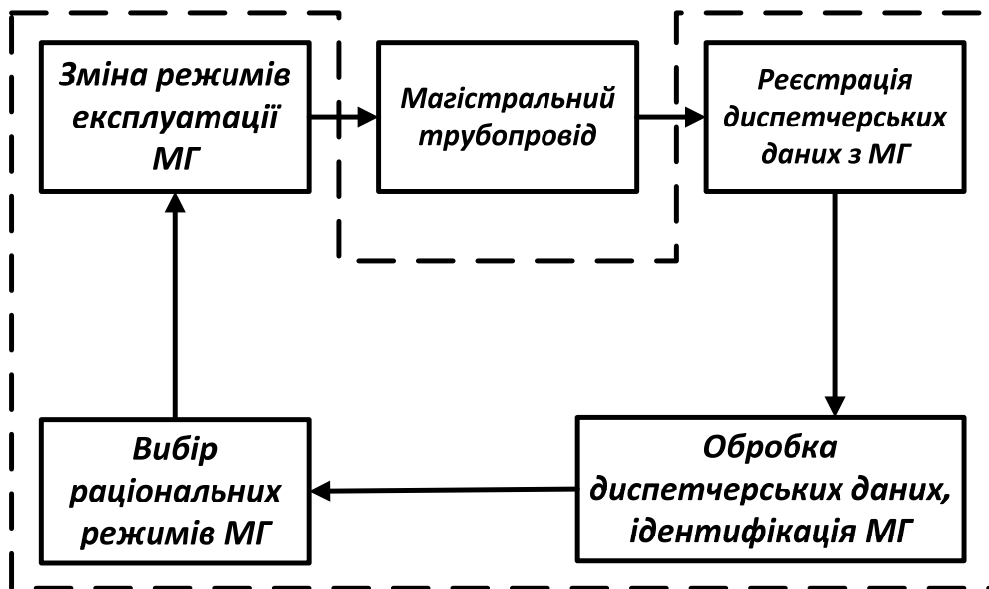


Рис. 2. Блок-схема диспетчерського оперативного управління режимами роботи МГ

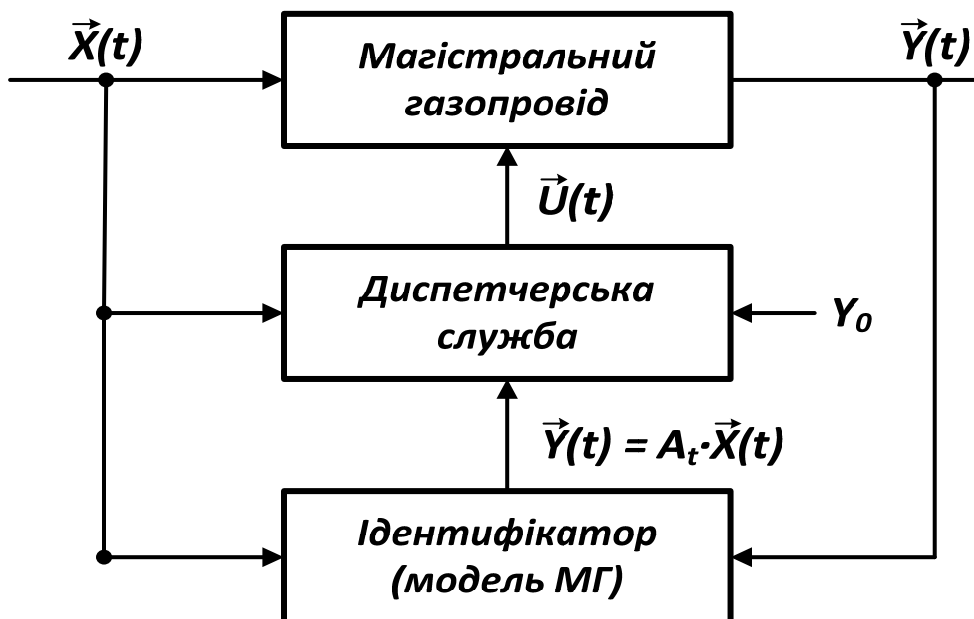


Рис. 3. Блок-схема диспетчерського управління МГ з ідентифікатором в ланцюгові зворотного зв'язку

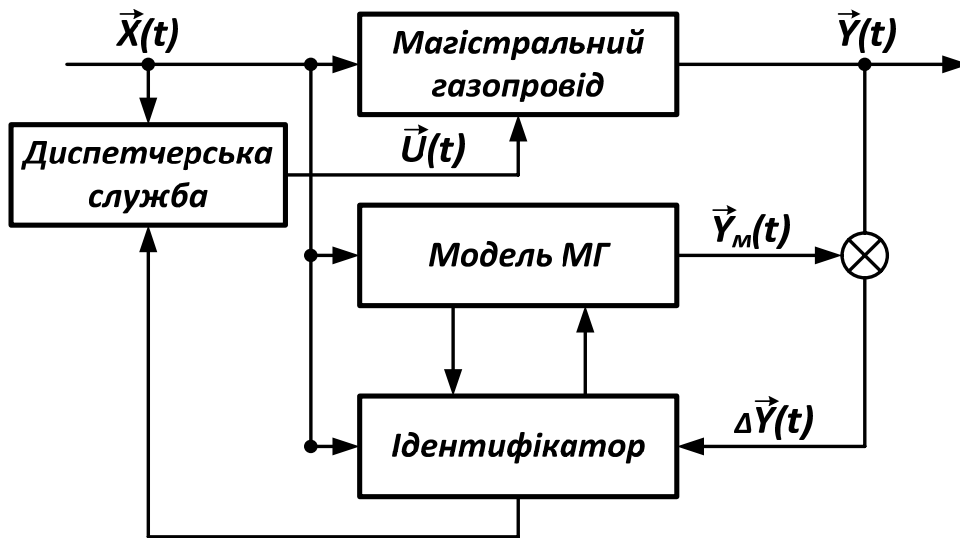


Рис. 4. Блок-схема диспетчерського адаптивного управління магістральним газопроводом

Процедура диспетчерського адаптивного управління працює безперервно і дозволяє відстежувати нестационарність моделі для МГ.

Задача ідентифікатора має дві сторони, вона виконує задачу стратегічної та оперативної ідентифікації МГ. В першому випадку визначається структура моделі, заданої регресійним рівнянням, у другому – відстеження (уточнення) коефіцієнтів моделі за значеннями неузгодженості в заданій структурі моделі. Наведені принципи управління реалізовані в роботі. Для стратегічної ідентифікації використовується алгоритм вибору найкращої моделі за умовою значимості факторів і мінімуму залишкової дисперсії, а для оперативної ідентифікації використовується однокроковий алгоритм адаптації

Основним недоліком використання регресійних рівнянь для цілей ідентифікації режимів роботи МГ є те, що МГ належить до класу нестационарних процесів. В той час, як регресійне рівняння використовуються для ідентифікації стаціонарних процесів і лише для тієї області зміни входних контрольованих змінних, в якій була проведена ідентифікація. При надходженні нової інформації коефіцієнти регресійної моделі необхідно постійно враховувати, в цьому випадку з'являється можливість використовувати регресійні рівняння для ідентифікації режимів роботи МГ.

На рис. 5 і 6 наведені приклади показують необхідність включення методів адаптації при використанні регресійних рівнянь для цілей прогнозування пропускної здатності магістрального газопроводу і вибору раціонального режиму експлуатації. На рис. 5 наведені три графіки, перший характеризує фактичні дані експлуатації магістрального газопроводу “Союз” в літній (липень) період часу, другий графік представ-

ляє собою передбачення цього ж параметра за моделлю режиму роботи в іншій період експлуатації – зимовий. Третій графік характеризує відхилення передбачених за моделлю фактичних значень Q_{ϕ} . Ця величина $RESI = Q_{\phi} - Q_m$ коливається в діапазоні $(-25 \div 380)$ т.м³/год, по відношенню до середнього значення для Q_{ϕ} , що дорівнює $Q_{\phi_{ср}} = 3269$ т.м³/год, помилка складає 11%. На рис. 5, 6 наведено графіки, відмінність полягає в тому, що тут для передбачення пропускної здатності в зимовий період експлуатації використовується “літня” модель. Параметр $RESI$ в цьому випадку змінюється в межах $(-75 \div 100)$ т.м³/год, по відношенню до середнього значення для фактичних даних за цей період (лютий 1982 р.) $Q_{\phi_{ср}} = 3666$ т.м³/год, помилка складає $(2 \div 2,8\%)$. Оскільки точність вимірювання фактичних значень складає 1,5%, то прогнозування за моделями на рис. 5 і рис. 6 є незадовільним.

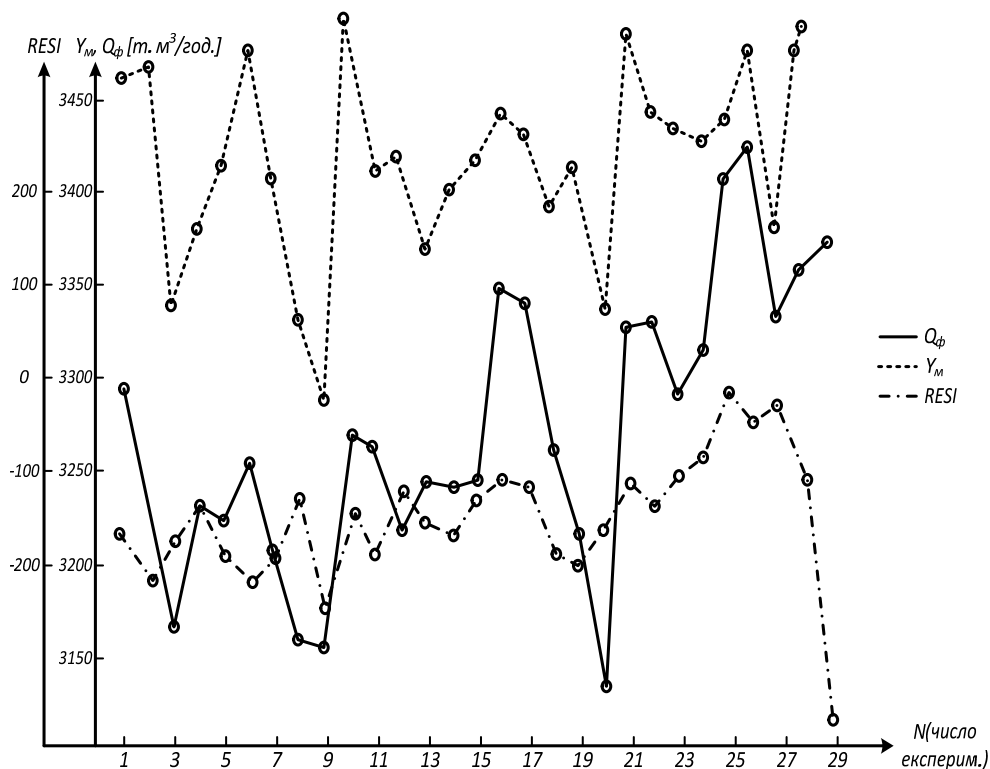


Рис. 5. Передбачення по «зимовій» моделі для МГ «Союз»

Як зазначалося вище, основним принципом ідентифікації в режимі постійного коригування коефіцієнтів регресії є принцип зворотного зв'язку. Перетворення вхідної функції $X(t)$ у вихідну $Y(t)$ здійснюється через оператор перетворення A_t , тоді $Y(t) = A_t X(t)$.

Блок ідентифікації обчислює оцінку вихідній функції $\hat{Y}(t)$ через оцінку оператора \hat{A}_t , $\hat{Y}(t) = \hat{A}_t \cdot X(t)$. Коригування оператора перетворення пропорційне відхиленню істинних значень для вихідної функції $Y(t)$ від обчисленої оцінки $\hat{Y}(t)$. На рис. 7 наведена блок-схема коригування оператора \hat{A}_t . Необхідність коригування оцінки оператора, крім перерахованих факторів, також пов'язана з наявністю неконтрольованої зміни самого оператора A_t . Причиною дрейфу може бути наявність неконтрольованих впливів, значення яких не були враховані або не могли бути враховані точно при побудові оператора, наприклад, старіння агрегатів на КС, зміна шорсткості внутрішньої поверхні трубопроводу і т.д. Як правило, зміна дрейфуючих параметрів значно повільніша, ніж зміна контрольованих параметрів для МГ, в цьому випадку вдається скоригувати оцінку оператора A_t таким чином, щоб найкращим чином (в сенсі мінімуму квадрата відхилення $Y(t)$ від $\hat{Y}(t)$) компенсувати вплив цих неконтрольованих параметрів.

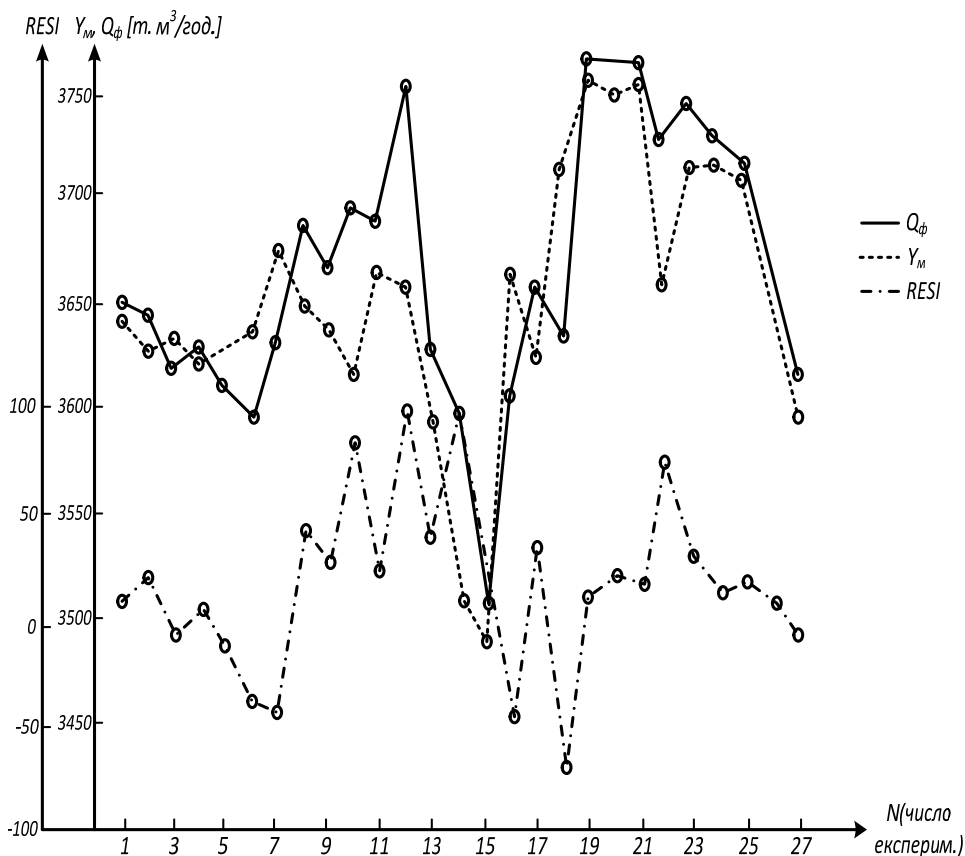


Рис. 6. Передбачення по «літній» моделі для МГ «Союз»

Нехай для опису режиму роботи МГ використовується регресійне рівняння виду:

$$Y_i = \sum_{j=1}^n \hat{a}_j x_j \quad (1)$$

або в матричному вигляді: $Y_i = \hat{A}^T \cdot X_i$,

де: Y_i , X_i – вихідна і вхідна змінні в момент часу.

Модель (1) будувалася за даними диспетчерської інформації, знятих у момент часу

$$i = t_0 + \Delta t; t_0 + 2\Delta t; \dots; t_0 + N\Delta t$$

де: i – дискретні моменти часу вимірювання Y_i та X_i ; Δt , N – інтервали часу, через які здійснюється експеримент і число експериментів відповідно.

Нехай значення y_i вимірюються з помилкою ε_i , тоді

$$y_i = y_i^* + \varepsilon_i$$

Для помилки ε_i зберігаються умови, введені в розділі 4.4. За наявності дрейфу коефіцієнти змінюються в часі. Задача ідентифікації полягає в знаходженні оцінки $\hat{A}(N + \alpha)$, тобто в моменти часу $i = N + \alpha$, де $\alpha = 0, 1, 2, \dots \ll N, \alpha \geq 0$. Нехай $\alpha > 0$, розв'язок цієї задачі відповідає задачі прогнозування (при $\alpha = 0$ фільтрації).

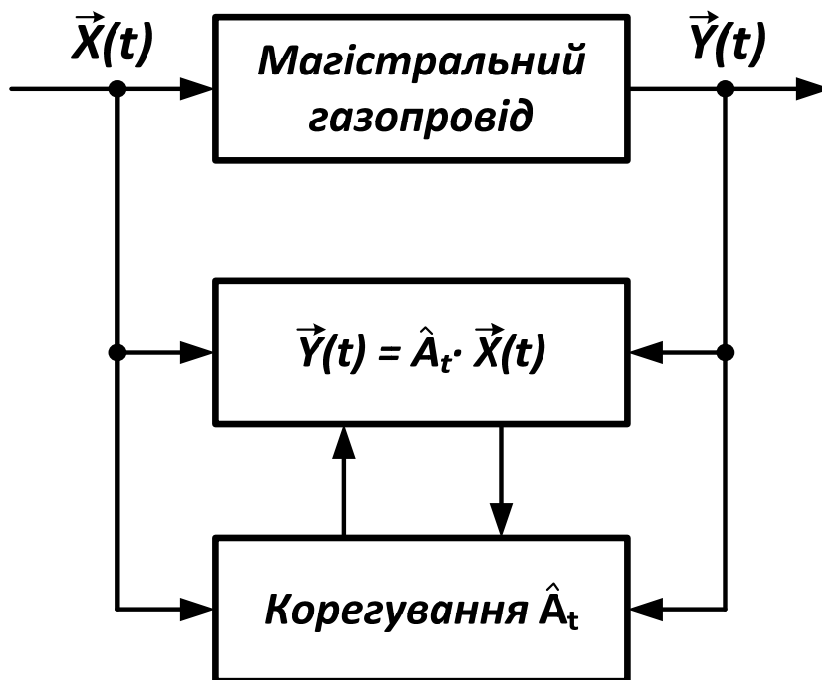


Рис. 7. Блок-схема корекції оператора \hat{A}_t для МГ

Представимо алгоритм обчислення оцінок $\hat{A}(N + \alpha)$ в рекурентній формі, в якій пов'язується обчислення оцінки для моменту часу $(N + \alpha)$ з раніше знайденою оцінкою для моменту часу $(N + \alpha)$ та диспетчерською інформацією, що надійшла в момент часу N . В загальному вигляді рекурентний алгоритм записується у вигляді:

$$\hat{A}(N + \alpha) = F[\hat{A}(N + \alpha - 1), x_N, y_N, \gamma] \quad (2)$$

де: F – деяка функція, що задає структуру алгоритму; γ – параметр алгоритму, який підлягає визначенню в процесі налаштування алгоритму.

Вплив диспетчерської інформації, отриманої в моменти часу N , $N - 1$, $N - 2$ і т.д. на точність оцінки $\hat{A}(N + \alpha)$ не однаковий. Для того, щоб це врахувати, вводиться функція ваги $\varphi(N, i, \gamma)$, тут i – номер поточного спостереження диспетчерської інформації.

Для визначення структури алгоритму F скористаємося критерієм найменших квадратів. Розглянемо величину:

$$L = \sum_{i=1}^N [y(i) - \hat{A}^T(N + \alpha) \cdot x(i)]^2 \varphi(N, i, \gamma). \quad (3)$$

Шукається мінімум L по $\hat{A}^T(N + \alpha)$, цей метод відповідає методу поточного регресійного аналізу. Мінімізуючи L по $\hat{A}(i + \alpha)$ отримуємо наступне рівняння

$$\hat{A}(i + \alpha) = (X_i^T W_i X_i)^{-1} \cdot (X_i^T W_i Y_i). \quad (4)$$

Порівнюючи рівняння (4) з (4.23) видно, що рівняння (4.23) є окремим випадком рівняння (4) при W_i – одиничній, тобто коли всі зміни диспетчерських даних $i = 1, 2, \dots, N$ вважаються рівноцінними.

Оцінка $A(i + \alpha + 1)$ обчислюється через відому оцінку $\hat{A}(i + \alpha)$ та додаткову вхідну інформацію X_{i+1} та Y_{i+1} (диспетчерську інформацію) таким чином:

$$\begin{aligned} \hat{A}(i + \alpha + 1) &= \left[X_{i+1}^T W_{i+1} X_{i+1} \right]^{-1} X_{i+1}^T W_{i+1} Y_{i+1} = \\ &= \hat{A}(i + \alpha) + \frac{(X_i^T W_i X_i)^{-1} X_{i+1}}{X_{i+1}^T (X_i^T W_i X_i)^{-1} X_{i+1} + \gamma} (Y_{i+1} - X_{i+1}^T \hat{A}(i + \alpha)). \end{aligned} \quad (5)$$

Алгоритм (5) відноситься до класу однокрокових алгоритмів, тобто для обчислення оцінки невідомих параметрів моделі (1) використовуються результати одного виміру, так для отримання $\hat{A}(i + \alpha + 1)$ необхідні вимірювання X_{i+1} та Y_{i+1} .

Вплив окремих i -их вимірювань позначається на величині уточнення через вибір параметра A . Наведені рекурентні алгоритми досить

громіздкі, серед однокрокових алгоритмів адаптації широке поширення отримав алгоритм виду:

$$\hat{a}_j(i) = \hat{a}_j(i-1) + \frac{y(i) - \sum_{j=1}^n \hat{a}_j(i-1) \cdot x_j(i)}{\gamma + \sum_{j=1}^n x_j^2(i)} \cdot x_j(i). \quad (6)$$

Величина коефіцієнтів на i -му кроці уточнення залежить від оцінок коефіцієнтів на $(i-1)$ -му кроці і від результатів вимірювання на i -му кроці вхідних змінних $x_j(i)$ і вихідних змінних $y(i)$. В матричному вигляді рівняння (6) можна записати у вигляді:

$$\hat{A}(i) = \hat{A}(i-1) + \frac{Y(i) - \hat{A}^T(i-1) \cdot X(i)}{\gamma + X^T(i) \cdot X(i)} \cdot X(i). \quad (7)$$

Величина, на яку виправляються коефіцієнти моделі (1) пропорційні помилці прогнозування:

$$\Delta y(i) = y(i) - \hat{y}(i)$$

Введемо вектор помилки визначення оцінок коефіцієнтів \hat{a}_j , одержимо:

$$\Delta a_j(i) = a_j(i) - \hat{a}_j(i), \quad j = 1, 2, \dots, n,$$

де: i – крок уточнення коефіцієнтів.

Величина цієї помилки змінюється з тактом зміни коефіцієнтів з рівняння:

$$\Delta a_j(i) = \Delta a_j(i-1) - \frac{\sum_{j=1}^n \Delta a_j(i-1) \cdot x_j(i)}{\gamma + \sum_{j=1}^n x_j^2(i)} \cdot x_j(i). \quad (8)$$

Умова монотонної збіжності полягає в тому, що сума квадратів помилки визначення всіх коефіцієнтів \hat{a}_j в кожному наступному кроці i в усякому разі не збільшується при будь-яких змінах вхідних даних $X(i)$ тобто

$$\lambda = \sum_{j=1}^n \Delta a_j^2(i-1) - \sum_{j=1}^n \Delta a_j^2(i) \geq 0. \quad (9)$$

Для того, щоб на довільному кроці i відбулося зменшення помилки, достатньо, щоб вхідний вектор $X(i)$ не був перпендикулярним до попереднього вектору помилок $\Delta A(i-1)$, або вхідні вектори $X(i)$ та $X(i-1)$ не повинні бути паралельними, тобто повторне уточнення по одному і тому ж вхідному вектору не зменшує помилку в визначенні коефіцієнтів моделі, вхідні змінні повинні бути лінійно незалежними. Найбільша швидкість збіжності оцінок \hat{a}_j до a_j виходить тоді, коли

скалярний добуток вхідних векторів дорівнює нулю. При розмірності вхідного вектора, що дорівнює \hat{a}_j , існує тільки n лінійно незалежних векторів, ортогональних один одному, після n кроків такого уточнення всі коефіцієнти будуть визначені абсолютно точно. Умова ортогональності вхідних векторів $X(i)$ можлива тільки в тому випадку, коли всі змінні x_j керовані незалежно один від одного, це збігається з проведенням активного експерименту на МГ. В умовах нормальної експлуатації МГ випадок ортогональних вхідних векторів практично неможливий, оскільки умова безпеки роботи агрегатів на КС, а також можливих втрат при проведенні такого експерименту виключають таку ситуацію. Для МГ доцільно використовувати статистичну ортогональність вхідних векторів. Умова статистичної ортогональності рівносильна умові статистичної незалежності як самих векторів, так і їх компонент, при цьому помилка в обчисленні необхідних параметрів спадає по експоненті [3,4]. Найбільша ефективність досягається при нульових значеннях математичного сподівання компонент вхідного вектора $X(i)$, отже доцільно провести центрування змінних щодо значень математичного сподівання.

Розглянемо вплив параметра γ і його призначення в рекурентному алгоритмі (6) і (7). Параметр γ вводиться для зменшення впливу послід, переписавши рівняння (7) у вигляді матричних перешкод, отримаємо:

$$\hat{A}(i) = \hat{A}(i-1) + \Delta(i) \cdot X(i), \quad (10)$$

$$\text{де: } \Delta(i) = \frac{\Delta A(i-1) \cdot X(i)}{\gamma + X^T(i) \cdot X(i)}.$$

Якщо є повторні однакові вектори $X(i)$ та $X(i+1)$, то

$$\Delta(i+1) = \frac{\gamma \cdot \Delta(i)}{\gamma + X^T(i) \cdot X(i)}. \quad (11)$$

При S повторних вхідних впливах і $S \rightarrow \infty$ коефіцієнти моделі дорівнюють:

$$\hat{A}(i+\infty) = \hat{A}(i-1) + \frac{\Delta A^T(i-1) \cdot X(i)}{X^T(i) \cdot X(i)} \cdot X(i). \quad (12)$$

Відповідно уточнення буде аналогічним як при відсутності перешкод або оптимальному кроці. При $\gamma \neq 0$ вигідно проводити уточнення оцінок \hat{a}_j , навіть якщо вхідні дії не змінюються.

Розглянемо властивості алгоритму (7) при змінних параметрах оператора перетворення A_i . В цьому випадку коефіцієнти змінюються в часі, запишемо цю умову вигляді:

$$a_j(i) = a_j(i-1) + \delta_j,$$

де: δ_j – зміна істинних значень коефіцієнта за один такт.

Умову збіжності оцінок \hat{a}_j до істинних значень на i -му кроці уточнення можна записати у вигляді наступного матричного рівняння:

$$\frac{\Delta A^T(i-1) \cdot X(i)}{X^T(i) \cdot X(i)} > \delta^T \delta + 2 \frac{\Delta A^T(i-1) \cdot X(i) \cdot \delta^T}{X^T(i) \cdot X(i)} \cdot X(i) - 2 \Delta A^T(i-1) \cdot \delta. \quad (13)$$

При малих значеннях параметрів δ_j ця нерівність завжди виконується, тобто при повільній зміні коефіцієнтів збіжності $\hat{a}_j \rightarrow a_j$ завжди буде забезпечена для $j = 1, 2, \dots, n$ з точністю до δ_j , при $\delta_j(i)$ та $\delta_j(i+1)$ незалежних для $i = 1, 2, \dots, n$.

Якщо для моделювання МГ використовуються диференціальні рівняння, то для їх розв'язання можна використовувати рекурентні процедури, в цьому випадку рівняння представляються за допомогою різницевих схем, або дискретного аналога цих рівнянь виду:

$$y(i) = \sum_{j=1}^n a_j x(i-j) + \sum_{j=1}^m q_j \cdot y(i-j), \quad (14)$$

де $y(i)$ – значення вихідного показника в момент часу i (в i -му такті); $x(i-j)$ – вхідне значення в момент часу $(i-j)$; a_j, q_j – невідомі параметри моделі.

Рівняння (14) відповідає одновимірному динамічному об'єкту. Для багатовимірного рівняння збільшиться в цьому випадку число сум – кожному виходу буде відповідати своя пара сум наведеного в (14) типу.

Якщо для моделювання береться модель (1), то при нестационарному режимі роботи магістрального газопроводу на основі розглядуваного алгоритму адаптації для пропускної здатності в кінці розраховуваної ділянки можна вивести таку рекурентну процедуру:

$$Q_S = \sum_{j=1}^n a_{jS} \cdot x_{jS} = \sum_{j=1}^n \left(a_{j-1,S-1} \cdot x_{jS} + \frac{\Delta Q_j \cdot x_{jS}}{\gamma + \sum_{j=1}^n x_{jS}^2} \right) = \sum_{j=1}^n a_{j-1,S-1} \cdot x_{jS} + \quad (15)$$

$$+ \sum_{j=1}^n \frac{Q_{\Phi S} - \sum_{j=1}^n a_{j-1,S-1} \cdot x_{jS}}{\gamma + \sum_{j=1}^n x_{jS}^2} \cdot x_{jS} = Q_{S-1} \cdot (1 - b_S) + Q_{\Phi S} \cdot b_S.$$

Невідомий коефіцієнт b_S задається за структурою розраховуваного магістрального газопроводу, як це робилося в 4.2 розділу 4, він дорівнює:

$$b_S = \sum_{j=1}^n \frac{x_{jS}}{\gamma + \sum_{j=1}^n x_{jS}^2}; x_{jS} = \sqrt{P_{jS}^2 - P_{jS}^2},$$

S – крок ітерації.

У даній роботі для моделювання режимів роботи МГ використовується апарат статистичної ідентифікації, розглянутий у попередніх розділах роботи. При виборі методів оптимізації необхідно враховувати цю особливість. Якість чисельних методів оптимізації характеризується багатьма факторами: областю збіжності, швидкістю збіжності, часом виконання однієї ітерації, об'ємом пам'яті, який необхідний для реалізації обраного методу, класом розв'язуваних задач і т.д. Слід також враховувати особливості задач за розмірністю оптимального вектора, багатокстремальні, гладкі і негладкі задачі і т.д.

Тому один і той же метод може виявитися ефективним для одного типу задач і абсолютно неприйнятним для іншого типу [1]. У зв'язку з перерахованими особливостями на сьогоднішній день не існує найкращого в усіх відношеннях універсального чисельного методу оптимізації. Тому є необхідним не пошук універсального методу, а розумне поєднання різноманітних методів, що дозволяє з найбільшою ефективністю вирішувати поставлені задачі. Для створення пакету програм необхідно мати такі методи оптимізації, що дозволяють всебічно досліджувати задачу. Найкращим способом використання пакету є робота в діалоговому режимі із заданим сценарієм розрахунків, такий динамічний режим роботи дає можливість на максимальному рівні використовувати досвід та інтуїцію розробника і користувача пакетом.

Для системи управління МГ відсутня можливість створення діалогового пакету оптимізації, тут структура пакету і послідовність обчислень зафіксована, це обмеження пов'язане з недостатньою технічною базою на ЦДП. Вимоги промислової експлуатації методів оптимізації накладає обмеження виду: заданий час роботи пакету на ЕОМ, задана точність обчислень, висока експлуатаційна надійність, клас розв'язуваних задач і т.д.

В основу створення пакету був покладений досвід підходу для розробки створення методології розрахунку оптимальних режимів роботи магістральних газопроводів провідних наукових організацій, який базується на виростанні сучасних комп'ютерних технологій і математичних методів оптимізації технологічних процесів. Пакет включає на різних рівнях розрахунку метод штрафних функцій і метод адаптивного випадкового пошуку який дозволяє виключити зациклення ітераційних процедур пошуку екстремуму в "особливих точках" за рахунок використання випадкового пошуку, тим самим підвищується надійність пакета в цілому. Також у пакеті є можливість врахування технологічних обмежень, які задані функціями довільного виду за рахунок використання методу штрафних функцій при розв'язанні задач нелінійного програмування. В пакеті в якості цільової функції використовується регресійне рівняння, задане у вигляді параболи і обмежень у вигляді багатомірного еліпсоїда розсіювання та лінійних обмежувальних функцій. Розв'язання цієї задачі оптимізації відноситься до класу випуклого про-

грамування [1] з наявністю одного глобального екстремуму. На рис. 8 наведено структурну схему пакету оптимізації, тут \vec{X} – вхідний вектор стану МГ; $\vec{X}_{опт}$ – вихідний вектор оптимального режиму роботи МГ.

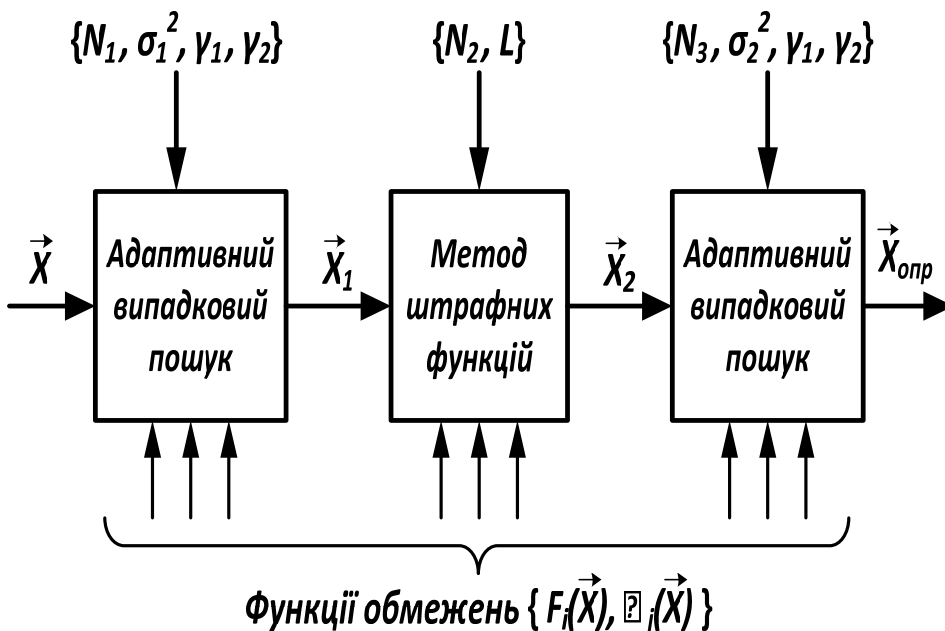


Рис. 8. Структурна схема пакету оптимізації

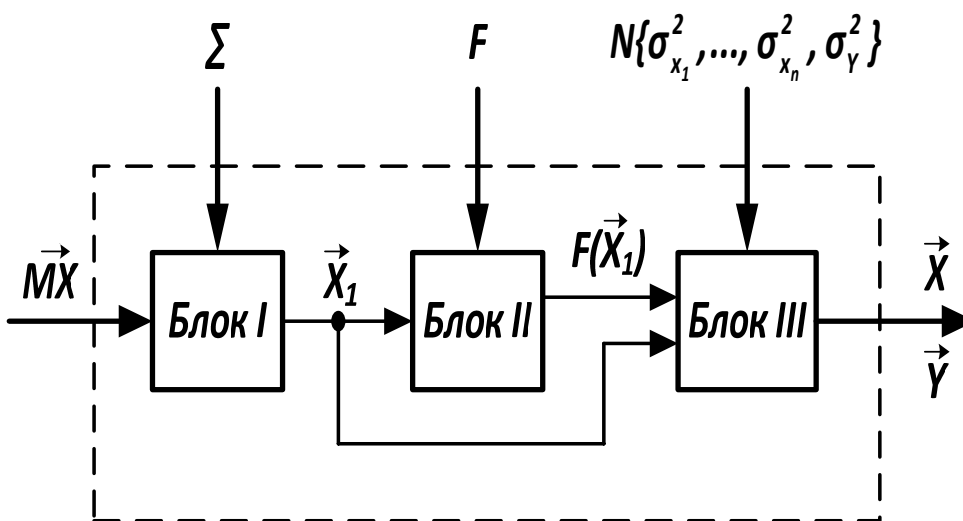


Рис. 9. Блок-схема імітації диспетчерських даних магістрального газопроводу на комп'ютері

Задача оптимізації режимів роботи МГ зводиться до наступної. Шукається $\max(F(\bar{X}))$ при $x \in \Omega_p$ цільової функції при обмеженнях:

$$F_i(\bar{X}) = 0; \quad i = 1, 2, \dots, l, \quad \varphi_j(\bar{X}) \leq 0; \quad j = 1, 2, \dots, m, \quad (24)$$

де: Ω_p – область працездатності для функції; $F(\bar{X})$ – цільова функція, що оптимізується (модель МГ); $F_i(\bar{X})$ – функція обмеження у вигляді рівності; $\varphi_j(\bar{X})$ – функція обмеження у вигляді нерівності.

Розв'яжемо задачу (24) методом штрафних функцій, для чого складемо функцію штрафу такого вигляду:

$$P(x, \tau) = -F(x_K) + \tau \cdot \left(\sum_{i=1}^l F_i(x_K)^2 + \sum_{j=l+1}^m \varphi_j^+(x_K)^2 \right), \quad (25)$$

$$\text{де } \varphi_j^+(x_K) = \begin{cases} 0, & \text{при } \varphi_j(x_K) \leq 0, \\ \varphi_j(x_K), & \text{при } \varphi_j(x_K) > 0. \end{cases}$$

Розглянемо задачу:

$$\max \min(P(x, \tau)) \quad \text{при } \tau \in T, x \in \Omega_p. \quad (26)$$

В роботах [1,2,3] показано, що при $T \rightarrow \infty$ розв'язання задачі (26) сходиться до розв'язання задачі (24). Вибравши значення штрафу τ досить великим ($\tau \approx 300$), градієнтним методом розв'язується тільки внутрішня задача рівняння (26). Рекурентний алгоритм пошуку екстремуму дорівнює:

$$x_i(s) = x_i(s-1) - B' \cdot P'(x_i, \tau), \quad (27)$$

де $i = 1, 2, \dots, n$, тобто пошук ведеться тільки за керуючими змінними. Тут s – крок ітерації за схемою (27).

Значення штрафу змінюється від 0 до τ_{\max} за законом:

$$\tau(s+1) = \tau(s) + \left(\sum_{i=1}^l F_i(x_K)^2 + \sum_{j=l+1}^m \varphi_j^+(x_K)^2 \right) \cdot \frac{C_1(\tau_{\max} - \tau(s))}{\sqrt{1+s}}.$$

Отже, якщо не виконуються обмеження у вигляді рівності або нерівності, то величина штрафу $\tau(s)$ збільшується пропорційно квадрату значень функцій $F_i(x_K)$, $\varphi_j(x_K)$. Параметри B' , C_1 підбираються для конкретного виду функцій, для початкового наближення його можна вибрати рівним $B' = 0,01$, $C_1 = 0,001$. Значення похідної обчислюється, якщо це можливо, аналітично, або чисельним методом, через приріст Δx_j , тоді

$$P'(x, \tau) = \frac{P(x + \Delta x, \tau) - P(x - \Delta x, \tau)}{2\Delta x}.$$

Адаптивний випадковий пошук за правильної організації є досить ефективним засобом пошуку глобального екстремуму [17, 29]. В області

пошуку Ω , що включає область Ω_p і обмеження у вигляді рівності і нерівності в постановці задачі (24) із заданою щільністю розподілу (в даному прикладі рівномірною) $P(X|m_x, \sigma_x^2)$ генеруються випадкові точки x_1, x_2, \dots, x_n . Для щільності розподілу: $m_x = \bar{X}$ – математичне сподівання, σ_x^2 – дисперсія випадкових величин. Алгоритм випадкового пошуку полягає в тому, що \bar{X} розташовується в точці з оптимальним (раніше знайденим) або похідним значенням функції, що оптимізується:

$$F_K(\bar{X}) = \min(-F(\bar{X})) = Q^*.$$

Пошук Q^* проводиться на підставі рекурентної процедури:

$$\bar{X} = X^* = \begin{cases} X_{i-1}^*; Q_i^* = Q_{i-1}^*, \text{ при } Q(X_i) \geq Q_{i-1}^*; \\ X_i; Q_i^* = Q(X_i), \text{ при } Q(X_i) < Q_{i-1}^*, \end{cases}$$

де: i – крок рекурентного пошуку.

Цей підхід гарантує знаходження глобального екстремуму, при цьому застосовується адаптація дисперсії σ_x^2 в процесі пошуку. Дисперсію зменшують при невдалих випадкових спробах і збільшують при вдалих, тобто

$$\sigma_i = \sigma_{i-1} + \Delta\sigma_i,$$

де:

$$\Delta\sigma_i = \varphi(\sigma_{i-1}, \Delta Q_{i-1});$$

або

$$\sigma_i = \begin{cases} \gamma_1 \sigma_{i-1}, \Delta Q_{i-1} > 0; \\ \gamma_2 \sigma_{i-1}, \Delta Q_{i-1} \leq 0. \end{cases}$$

Коефіцієнти $\gamma_1 < 1$, $\gamma_2 \geq 1$, чисельні значення для них підбираються в конкретно розв’язуваних задачах. При γ_1 і γ_2 близьких до одиниці, швидкість пошуку зменшується і адаптація дисперсії відсутня. При γ_1 і γ_2 відмінних від одиниці проводиться адаптація дисперсії, це збільшує швидкість пошуку, однак глобальний екстремум в цьому випадку може бути не знайдений. Для розв’язуваної задачі, цільова функція, що оптимізується, з системою обмежень утворюють випуклу множину, в якому локальний і глобальний екстремуми збігаються, отже, доцільніше використовувати алгоритм з адаптацією.

На першому кроці роботи пакета оптимізації (рис. 8) працює алгоритм випадкового пошуку (з адаптацією дисперсії пошуку). В якості початкової точки пошуку \bar{X}_0 береться вектор \bar{X} – вектор вхідної диспетчерської інформації. Далі вводяться параметри, що задають режими роботи цього методу пошуку: N_1 – число ітерацій; σ_{i1}^2 – дисперсія випадкового розкиду за керуючими параметрами; γ_1, γ_2 – коефіцієнти беруться відмінними від одиниці. Також вводяться функції обмежень для

задачі (24), які задають область працездатності цільової функції Ω_p і функції обмежень у вигляді рівностей і нерівностей.

Після N_1 ітерацій на виході одержується вектор \bar{X}_1 для якого виконуються обмеження і отримано максимальне значення цільової функції $Q_1^* = F(\bar{X}_1)$. Вектор \bar{X} є початковим вектором для методу штрафних функцій. Основним призначенням першого блоку в пакеті оптимізації є формування початкового вектора для алгоритму штрафних функцій, оскільки ефективність останнього дуже чутлива до його вибору.

Для задачі режиму роботи алгоритму штрафних функцій вводяться: N_2 – число ітерацій; σ_{li}^2 – вектор параметрів, він включає наступні значення: τ_{\max} , l , m , c_1 , Δx . Також вводяться обмеження на допустиму область задачі (24). На виході цього блоку в пакеті оптимізації після N_2 ітерацій одержується вектор \bar{X}_2 для якого $Q_2^* = F(\bar{X}_2)$.

В останньому блоці пакету оптимізації знову використовується адаптивний випадковий пошук. Вхідним вектором цього блоку є вектор \bar{X}_2 . Режим роботи, як і для блоку 1, задаються параметрами: σ_{2i}^2 , N_3 , γ_1 , γ_2 . Відмінною особливістю роботи цього блоку в порівнянні з блоком 1 є: $\sigma_{2i}^2 > \sigma_{li}^2$, $\gamma_1 = 1$, $\gamma_2 = 1$. Основним завданням блоку 3 є перевірка вектора \bar{X}_2 на глобальний екстремум.

Вигляд функції обмежень для задачі (24) задається наступним чином: область працездатності для цільової функції, заданої регресійним рівнянням, обмежена багатовимірним еліпсоїдом розсіювання виду:

$$\Omega_p : (X - \bar{X})^T \cdot (RX)^{-1} \cdot (X - \bar{X}) - Q \leq 0. \quad (28)$$

Матриця RX обчислюється на стадії попереднього статистичного вивчення МГ, вона характеризує взаємний парний вплив параметрів у векторі стану \bar{X} . Параметр Q також вибирають на стадії попереднього статистичного аналізу із заданим рівнем ймовірності попадання даних диспетчерської інформації всередину. Конкретний вигляд функції в рівностях і нерівностях визначається технологічними обмеженнями для конкретно розраховуваного МГ. Слід зазначити, що обмеження у вигляді рівності є найбільш складним видом обмежень для задачі нелінійного програмування. В практичних розрахунках доцільно їх замінити обмеженнями у вигляді нерівності.

З урахуванням вимог надійності найбільш вразливим місцем у пакеті є використання методу штрафних функцій. Згідно з ітераційним алгоритмом пошуку (27) зміна вектора стану в процедурі дорівнює:

$$\Delta x_j(s) = B \cdot \bar{P}'(x, \tau),$$

де: s – номер ітерації.

В разі невиконання обмежень різко зростає значення $P'(x, \tau)$ і відповідно $\overline{\Delta x_j}(s)$. Оскільки для методу пошуку передбачається, що $\tau(s)$ велика величина, то вектор зміни $\overline{\Delta x_j}(s)$ спрямований в напрямі виконання обмежень. При невдалому виборі параметра штрафу можливий випадок стрибків $(s) \rightarrow (s+1)$, в яких значення x_j на такті s та $s+1$ будуть поза допустимою областю обмежень (в різних напрямках). В цій ситуації можливе розгойдування алгоритму, яке при розрахунку на ЕОМ через обмеження розрядної сітки призведе до аварійної зупинки.

Для запобігання розгойдування алгоритму пошуку вводяться обмеження на величину зміни вектора, які дорівнюють:

$$|\Delta x_j(s)| \leq \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (x_{jN}(s) - x_{jM}(s))^2}{3}}, \quad (29)$$

де: $x_{jN}(s)$, $x_{jM}(s)$ – розв'язок задачі перетину поверхні другого порядку з прямою.

Швидкість збіжності задачі оптимізації залежить від правильного вибору параметрів режиму роботи пакету σ_1^2 , L , σ_2^2 , γ_1 , γ_2 . Їх оптимальний вибір представляє розв'язання самостійної дослідної задачі. Час рахунку на ЕОМ залежить від числа ітерацій N_2 і N_3 .

Задача диспетчерського оптимального управління режимами роботи МГ включає в себе розв'язання наступних задач:

1. Задача статистичної ідентифікації або побудови регресійних моделей параболічного виду за даними диспетчерської інформації.

2. Задача визначення диспетчерського оптимального керування для МГ. В результаті розв'язання цієї задачі обчислюються оптимальні керуючі параметри режимів роботи МГ – тиску на КС вздовж траси МГ.

3. Задача адаптації в диспетчерському оптимальному управлінні розв'язання двома методами. В першому випадку вигляд моделі для МГ залишається невідомим, коригуються лише коефіцієнти моделі з використанням однокрокового алгоритму адаптації. В другому випадку передбачається побудова нового регресійного рівняння за новими диспетчерським даними.

4. Задача прогнозування вихідного показника якості роботи МГ, вибір критерію якості задається значенням пропускну здатності в кінці розраховуваної ділянки МГ.

На рис. 10 наведено функціональну схему диспетчерського оптимального управління МГ, яка складається з семи основних блоків.

За результатами проведених досліджень можна помітити, що вплив неконтрольованих збурень призводить до зміщення режимів роботи магістрального газопроводу від проектного, запропоновані схеми

диспетчерського управління дозволяють компенсувати цей вплив в режимі оперативного диспетчерського управління за даними диспетчерської інформації.

Для моделювання несталого режиму магістрального газопроводу доцільно використовувати адаптивний підхід. Аналіз існуючих розв'язків цієї задачі з використанням різницевої схеми показав, що рекурентна процедура послідовного уточнення коефіцієнтів моделі з використанням запропонованого однокрокового алгоритму адаптації є окремим випадком цих різницевої схеми.

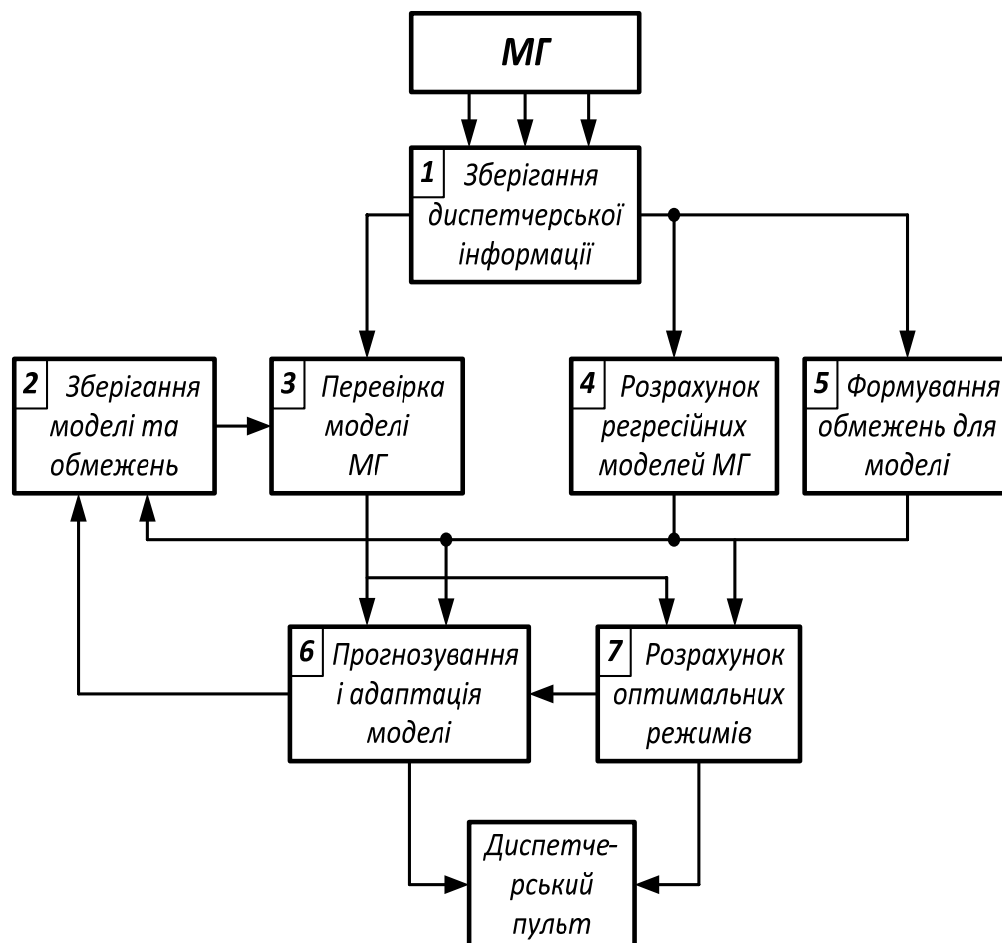


Рис. 10. Функціональна схема диспетчерського управління МГ

На відміну від використовуваних раніше стохастичних методів апроксимації режимів магістральних газопроводів, запропонований метод адаптації може бути використаний для диспетчерської інформації, навіть з урахуванням її неповної інформативності.

Розроблена програма адаптації дозволяє коригувати коефіцієнти регресійних моделей в реальному масштабі часу, що є суттєвим при

оперативному диспетчерському управлінні, аналітично доведено збіжність алгоритму адаптації та зроблено конкретні вимоги до диспетчерських даних, при яких швидкість збіжності буде максимальною. Досліджено стійкість алгоритму адаптації до похибки в обчисленні диспетчерських даних, встановлено аналітичними залежностями пороги точності, при яких збіжність алгоритму буде незадовільною.

Для розрахунку оптимальних режимів роботи магістральних газопроводів з використанням регресійних рівнянь для розрахунку пропускної здатності в кінці розраховуваної ділянки доцільно використовувати пакет програм оптимізації, що складається з різних за своєю структурою програм, це необхідно для підвищення надійності розв'язання задачі оптимізації в практичній експлуатації. Доцільно використовувати метод штрафних функцій і метод адаптивного випадкового пошуку.

Література

1. Грудз В.Я. Характеристика режимів роботи компресорних станцій магістрального газопроводу / В.Я.Грудз, Я.В.Грудз, В.І.Слободян // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – № 4. – 2010. – С. 124-126.
2. Грудз Я.В. Енергоефективність газотранспортних систем / Я.В.Грудз. – Івано-Франківськ: Лілея НВ, 2012. – 186 с.
3. Трубопровідний транспорт газу / М.П.Ковалко, В.Я.Грудз, В.Б.Михалків та ін. – Київ, АренаЕКО, 2002. – 600 с.
4. Грудз В.Я. Технічна діагностика трубопровідних систем / В.Я.Грудз, Я.В.Грудз, В.В.Костів та ін. – Івано-Франківськ.: Лілея-НВ, 2012. – 512 с.
5. Грудз Я.В. Оптимізація режимів роботи газопроводу з урахуванням енерговитратності транспорту газу/ Я.В.Грудз // Нафтогазова енергетика. – 2012. – №2. – С. 12-15.
6. Orynyak I.V. The spring splines procedure with prescribed accuracy for determination of the curvatures of the pipeline based on the 3-D measurements of its position / I.V.Orynyak, I.V.Lokhman // Rio Pipeline Conference & Exposition 2011, IBP1029–11.

Стаття надійшла до редакційної колегії 20.12.2013 р.

Рекомендовано до друку д.т.н., професором Грудзом В.Я., д.т.н., професором Говдяком Р.М. (м. Київ)

ALGORITHMS AND METHODS OF CONTROLLER'S OPTIMUM MANAGEMENT BY MODES OF MAIN GAS PIPELINES

D. F. Tymkiv

Ivano-Frankivs'k National Technical University of Oil and Gas;

76019, Ivano-Frankivs'k, Carpats'ka str., 15;

ph. +380 (3422) 4-21-57; e-mail: public@nung.edu.ua

The decision of the tasks related to optimization of office hours MG is examined, taking into account the actual being GPA and being LD in a main gas pipeline. The existent charts of controller's management MG are parted on two systems centralized and decentralized. The second chart of controller's management takes certain advantages on firmness of decision and reliability of the realization, related to that for the first type of management necessary very difficult nonlinear dynamic model, and also large volume of controller's information.

Key words: *optimization of the modes, management charts, algorithms, methods.*