

ОПТИМІЗАЦІЯ ПОСТАЧАННЯ ПРИРОДНОГО ГАЗУ ЗА КРИТЕРІЄМ НАДІЙНОСТІ

В.Я. Грудз¹, Я.В. Грудз¹, В.М. Боднар², В.Б. Запужляк¹,
Л.Я. Побережний¹

¹Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Україна

²БМФ Укргазпромбуд, Україна

Abstract. The optimization problem of gas pumping planning is set and solved taking into account the expected losses, on the basis of which the transfer of the controlled system from the initial state to the final one is carried out by such a sequence of states that minimizes the total cost of the system evolution.

В період дефіциту постачання газу в Україну особливе значення надається скороченням недопоставок його споживачам, тобто повному і безперервному їх газозабезпеченню. З іншого боку зростають втрати газу, пов'язані з технологічними затратами на транспортування, зокрема, викликані нестационарністю газових потоків і частими змінами режимів роботи газотранспортної мережі [1,2].

Як відомо, втрати від недопоставок газу споживачам значно перевищують втрати, пов'язані з технологічними затратами на транспорт газу [3]. Тому тут розглядається задача вибору оптимального співвідношення між вартістю і надійністю перекачування газу.

Для задоволення вимог максимізації навантаження газотранспортної системи при відповідних технологічних обмеженнях і гарантії безперервності в постачанні споживачам заданої витрати газу зазвичай вирішуються такі основні завдання: - прогнозування навантаження протягом певного інтервалу часу (добы, тижня і т. д.); - виділення набору газоперекачувальних агрегатів компресорної станції; - відшукування оптимального розподілу загального навантаження між газоперекачувальними агрегатами, що мінімізує сумарну вартість перекачування.

З метою вирішення завдання оптимального планування перекачування газу перш за все відшукуються очікувані втрати через недостатню надійність постачання споживачів газом. Кожен агрегат системи в процесі функціонування може перебувати в стані відмови і в стані роботи з частковою втратою вихідної потужності. Ймовірності стану системи представляються у вигляді добутку ймовірностей стану окремих елементів.

Нехай $M_l(t_1, t_2)$ - математичне очікування частки часу знаходження системи в стані l протягом інтервалу (t_1, t_2) , тоді

$$M_l(t_1, t_2) = \frac{1}{t_1 - t_2} \int_{t_1}^{t_2} P_i(t_i) dt, \quad (1)$$

де $P_i(t_i)$ – ймовірність того, що в момент t_i система знаходиться в стані i .

Ймовірності станів всієї системи, що складається з R агрегатів, в дискретному виді матиме вигляд

$$P_i(t_i) = \prod_{r=1}^R P_{ri}(t). \quad (2)$$

Якщо $t = n\Delta t$, де Δt – крок часу, то вираз (2) набуде вигляду

$$P_i(n\Delta t) = \prod_{r=1}^R P_{ri}(n\Delta t).$$

Тоді інтеграл (1) можна представляти в дискретному вигляді

$$M_l(t_1, t_2) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^N \frac{P_i(n\Delta t) + P_i(n+1)\Delta t}{2} = \frac{I_i(t_1, t_2)}{(t_1 - t_2)}. \quad (3)$$

Очікуване число переходів в стан i на інтервалі часу (t_1, t_2) визначається формулою

$$F(t_1, t_2) = \sum_{j \neq i} \int_{t_1}^{t_2} P_j(t) \lambda_{ji} dt, \quad (4)$$

де λ_{ji} – інтенсивності переходів зі стану i в стан $i+1$, $j=i+1$.

У дискретній формі маємо

$$F(t_1, t_2) = \sum_{j \neq i} \lambda_{ji} I_i(t_1, t_2).$$

Припустимо, що для перекачки газу на інтервал часу (t_1, t_2) виділено певну кількість агрегатів R і прогнозована кількість перекачування становить G_0 . Протягом зазначеного інтервалу часу справжнє навантаження G може коливатися щодо величини G_0 відповідно до нормального закону розподілу. Недостатність в постачанні газу, яка виникає в результаті відмови деяких агрегатів і внаслідок випадкових збурень, теоретично може коливатися від 0 до G (на практиці діапазон зміни нестачі кількості газу досить вузький через акумулюючу здатність газопроводу). В силу цього передбачається, що залежність між загальними вартісними втратами і величиною нестачі кількості газу є лінійною

$$C^n = C_1 H,$$

де C^n – вартісні втрати; C_1 – коефіцієнт; H – недостача газу споживачам.

При нормальному законі розподілу випадкових величин загальні втрати підсумовуються як втрати на перекачування та втрати через недоподачу газу. Ці втрати можна подати таким чином

$$W = C_2 \sum_j \sum_i [\sum_{j \neq i} \lambda_{ji} I_{ij}(t_1, t_2)] u_{ij}^n A_j + C_3 \sum_j \sum_i I_{ij}(t_1, t_2) H_{ij} A_j,$$

де C_2, C_3 – коефіцієнти, що враховують вартість від перекачування і недоподачі; u_{ij}^n – дискретна зміна втрат за час Δt ; A_j – коефіцієнт, що враховує розподіл втрат по нормальному закону.

Кількість перекачуваного газу G_0 , зазначені втрати і недостача H приймають дискретні значення в інтервалах $n\Delta t$, де число можливих значень H залежить від числа станів всієї системи, причому кожному стану відповідає певне значення потужності комбінацій агрегатів. В якості універсального рівняння для агрегату можна використати вираз

$$P_i^2 - \alpha P_j^2 = \varphi Q_{ij} + \psi Q_{ij}^2, \quad (5)$$

де Q – продуктивність газопроводу.

Коефіцієнти α, φ, ψ є параметрами r -го агрегату, які вважаються відомим; P_{1r}, P_{2r} – тиски на вході і виході r -го агрегату, тобто

$$P_{1r}^2 - \alpha_r P_{2r}^2 = \varphi_r Q_{ij} + \psi_r Q_{ij}^2, \quad Q = \sum_{r=1}^R m_r Q_r,$$

де r – номер ГПА в групі; R – число ГПА в групі; m_r – коефіцієнт, що дозволяє виключити з розгляду непрацюючі елементи, рівний 1, або 0.

Для двох послідовно з'єднаних елементів еквівалентні коефіцієнти

$$\alpha = \alpha_1 \alpha_2; \quad \varphi = \varphi_1 + \alpha_1 \varphi_2; \quad \psi = \psi_1 + \alpha_1 \psi_2.$$

Отримані рівняння не в повному обсязі визначають пропускну здатність системи через обмеження за продуктивністю кожного агрегату, тому їх доцільно звести до іншого виду відносно витрат на перекачування

$$f_1(Q) = f(\varepsilon_i, N_i, \eta_i, n_i, C_i), \quad (6)$$

де ε_i – ступінь підвищення тиску; N_i – потужність агрегату; η_i – ККД; n_i – частота обертання; C_i – питомі витрати.

Позначивши a_r, b_r нижні і верхні межі вихідної потужності кожного агрегату, матимемо $A_R \leq G \leq B_R$, де $A_R = \min(a_1, a_2, \dots, a_R)$; $B_R = \sum_{r=1}^R b_r$. З графіків споживання можна отримати верхні і нижні границі необхідної кількості газу для k -го споживача на кожному кроці обчислення. Тоді мінімум вартості в одиницю часу є оптимальним рекурентним співвідношенням: $f_R(G) = \min\{f_R(x) + f_{R-1}(G-x)\}$, де x – поточна кількість перекачаного газу.

Якщо $\varepsilon_i, \eta_i, n_i$ – постійні величини, то використання останніх співвідношень дає оптимальну схему виділення агрегатів і розподілу навантаження між ними. При сталості $\varepsilon_i, \eta_i, N_i$ можна отримати оптимальне керування у вигляді зміни частоти обертання n_i . З урахуванням втрат через ненадійність перекачування газу завдання оптимального планування представляється в такий спосіб. Для прогнозованого добового споживання відрізок в 24 години розділяється на 12 інтервалів. На кожному етапі визначається програма перекачування газу, яка мінімізує сумарні витрати на перекачування з урахуванням надійності газопостачання. Якщо встановлено R агрегатів на КС, то загальне число можливих комбінацій агрегатів складає R , звідки можна отримати розмірність вирішуваної задачі динамічного програмування.

На кожному етапі f_{nj} – вартість перекачування газу при j -тій комбінації агрегатів на етапі n_j ; W – очікувані втрати через недостачу газу при використанні комбінації j на етапі n_j . Мінімум сукупних затрат f_{nj} для комбінації j на етапі n_j можна знайти за допомогою рекурентного співвідношення:

$$F_{nj} = \min\{F_{n-1} + f_{nj} + W_{nj}\}. \quad (7)$$

Ідея алгоритму полягає в наступному: розглядається послідовність моментів часу 0, 1, 2, Керована система в кожен момент часу може знаходитися в одному з j станів. Керування системою, що знаходиться в момент часу n в стані j_n , полягає в тому, що приймається рішення про переведення її в момент $n+1$ в стан j_{n+1} . Визначена локальна ціна такого переходу, тобто число (для всіх можливих пар j_n, j_{n+1}). У початковий момент часу $n = 0$ система може знаходитися в якомусь фіксованому j_0 стані. У кінцевий момент часу N система повинна знаходитися в одному із заданих j_N станів. Завдання полягає у визначенні такої послідовності станів (траєкторії) $f_0, f_1, \dots, f_n, \dots, f_N$, яка мінімізує загальну ціну еволюції системи, тобто функції

$$R(f_0, f_1, \dots, f_N) = \Phi_0(f_0) + \sum_{n=0}^{N-1} f_{j_n, j_{n+1}}^{n+1/2} + \Phi_N(j_N)$$

де Φ_0, Φ_N – витрати на початковий і кінцевий стан системи.

Рішення задачі здійснюється спеціальним алгоритмом, що використовує типову для динамічного програмування функцію Беллмана $F_N(j)$, яка визначається наступним чином: нехай система в момент n знаходиться в стані j . Потрібно перевести її до моменту N , мінімізуючи за рахунок вибору станів f_{n+1}, \dots, f_N значення

$$\sum_{n=0}^{N-1} f_{j_n, j_{n+1}}^{n+1/2} + \Phi_N(j_N), \quad j_N = j. \quad (8)$$

Мінімум (8) знаходиться методами динамічного програмування, в результаті чого обчислюється функція $F_N(j)$ для всіх n і j . Це рівняння отримується на підставі наступного принципу оптимальності: перехід зі стану j в момент n в деякий стан j_N в

момент часу N можна здійснити в два етапи. Спочатку система переводиться в стан в момент $n+1$, а потім з цього стану оптимальним чином за ціну, $F_{n+1}(i)$ – в кінцевий стан. Загальна вартість такого переходу складає

$$f_{j_i}^{n+1/2} + F_{n+1}(i).$$

Так як j вважається фіксованим, то параметром оптимізації є номер стану i в момент $n+1$. Тоді рівняння динамічного програмування буде

$$F_n(j) = \min\{f_{j=i}^{n+1/2} + F_{n+1}(i)\}.$$

Таким чином, знайшовши всі $F_N(j)$, вирішуємо задачу $\min\{\Phi_0(j) + F_0(j)\}$ і визначаємо першу точку траєкторії j_0 . Потім визначають точки $j_1 = i_{1/2}(j_0)$, $j_2 = i_{1+1/2}(j_1)$ і так далі до побудови всієї траєкторії. На основі викладеної методики прогнозування оптимальних параметрів режиму газопостачання з урахуванням чинника надійності проведено розрахунки оптимізації експлуатації компресорної станції Богородчанського ПСГ за 24.08.2017 р періоду компресорного закачування газу в сховище (рис.1).

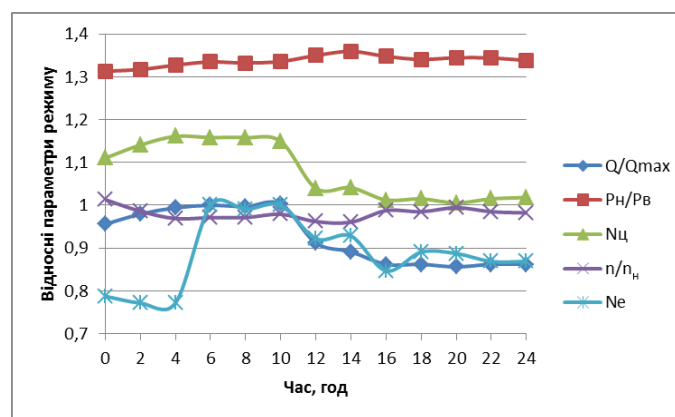


Рисунок 1 – Результати розрахунку оптимізації експлуатації компресорної станції Богородчанського ПСГ

Вихідними даними для реалізації поставленої оптимізаційної задачі служили реальні показники експлуатації компресорної станції в період закачування газу в сховище. В результаті проведених обчислень за запропонованою методикою оптимізації визначено оптимальні розрахункове число компресорних циліндрів $N_{ц}$, швидкість обертання колінвалау n/n_n та ефективну потужність компресора N_e . Прогнозні параметри впроваджено у виробництво, і їх порівняння з фактичними показало задовільну збіжність.

Висновки: Вирішено важливу технологічну задачу оптимального планування перекачування газу з врахуванням очікуваних втрат через недостатню надійність забезпечення споживачів газом і випадкове навантаження системи, яка полягає в тому, що приймається рішення про переведення керованої системи з початкового стану в кінцевий шляхом такої послідовності станів, яка мінімізує загальну ціну еволюції системи.

Література

1. Трубопровідний транспорт газу./М.П. Ковалко, В.Я. Грудз, В.Б. Михалків та ін. – Київ: АренаЕКО, 2002. – 600 с.
2. Енергетична безпека держави: високоефективні технології видобування, постачання і використання природного газу/ Крижанівський Є.І., Гончарук М.І., Грудз В.Я та ін. – Київ:ІнтерпресЛТД, 2006. – 282 с.
3. Грудз В.Я. Обслуговування і ремонт газопроводів/ В.Я. Грудз, Д.Ф. Тимків, В.Б. Михалків та ін. – Івано-Франківськ:Лілея-НВ, 2009. – 711 с.
4. Трубопровідний транспорт жидких и газообразных энергоносителей/ Е.И. Яковлев, В.А. Иванов, Б.А. Клюк и др. – Москва: ВНИИОЭНГ, 1993 – 391 с.
5. Бусленко Н.П. Автоматизация имитационного моделирования сложных систем/Н.П.Бусленко – М.: Наука, 1977. – 536 с.