

ОПТИМАЛЬНЕ ПЛАНУВАННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ГАЗАЗОТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМ В УМОВАХ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОСТІ

Я. В. Грудз

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу;
76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15;
тел. +380 (3422) 4-23-42; e-mail: public@iung.edu.ua*

Приведено методи побудови областей допустимих режимів компресорних станцій магістральних газопроводів і граничних областей енергозатрат. Пропонується використати побудовані області допустимих режимів і граничну область енерговитрат з метою оптимізації режимів роботи газотранспортної системи.

Ключові слова: *область допустимих режимів, гранична область енерговитрат, режим, оптимізація.*

Процес керування складною газотранспортною системою звичайно розбивається на два етапи: планування режиму роботи і наступна його стабілізація. Для магістральних газопроводів інтервал планування режимів складає переважно місяць і більше. Як правило, використовуються стаціонарні моделі елементів магістральних газопроводів (МГ), а оптимальний режим знаходиться за допомогою методу динамічного програмування.

Застосування методу динамічного програмування до вибору оптимального плану описано в [1]. Програми, які реалізують запропоновані там алгоритми, широко використовуються на практиці. Однак ці алгоритми призначені для знаходження рішення однокритеріальної задачі оптимізації при цьому зміна глобального критерію приведе до необхідності вибору нової моделі.

В даний час в практиці планування режимів газотранспортних систем необхідно одночасно враховувати декілька основних критеріїв оптимальності, а саме: максимум пропускної здатності газопроводу, максимум тиску на виході компресорної станції (КС), максимум акумуляції газу в трубопроводі, мінімум енергозатрат на компримування при заданому плані подачі газу та ін. Згортка критеріїв при цьому може здійснюватися одним із методів [2]:

- один із локальних критеріїв вибирається в якості оптимізуючої функції, а на інші накладаються відповідні обмеження;

- критерії виставляються в лексикографічну впорядковану послідовність по спаданню значимості і порівняння цільової функції по i -му

критерію здійснюється для тих критеріїв, для яких виявились рівними значення $(i-1)$ -го критерію.

Для систем газопостачання вибір основного критерію оптимізації залежить від стану навколишнього середовища (наприклад, потреба в понадпланових поставках). Застосування задач, які жорстко фіксують мету керування, нераціональне. Велике значення в цій ситуації займає розробка і застосування моделей, для яких зміна головного критерію, або зміна лексикографічного порядку на множині локальних критеріїв не веде до рішення нової задачі або зміни методу рішення. На даний час до них належить модель елементів газотранспортної системи (ГТС), в основу яких покладено використання областей допустимих режимів.

Планування режимів магістрального газопроводу повинно проводитись з урахуванням технологічних обмежень, обумовлених характеристиками міцності труб, гідродинамічними і температурними характеристиками газопроводів і газоперекачувальних агрегатів (ГПА). До цих обмежень відносяться: максимальний робочий тиск в газопроводі P_{\max} , мінімальна Q_{\min} і максимальна продуктивність Q_{\max} на вході в нагнітач, максимально допустима температура T_{\max} , діапазон зміни частоти обертання нагнітача n , максимально допустиме навантаження на валу приводу N_{\max} . Виразимо ці обмеження у вигляді системи нерівностей:

$$\begin{aligned} \frac{n_0}{n} Q_{BC} &\geq 1.1 Q_{\min}, \\ \frac{n_0}{n} Q_{BC} &\leq Q_{\max}, \\ n_{\min} &\leq n \leq n_{\max}, \\ T &\leq T_{\max}, \\ P_H &\leq P_{\max}, \\ N &\leq N_{\max}, \end{aligned} \quad (1)$$

де n_0 – номінальне значення частоти обертання ротора нагнітача.

Область допустимих режимів (ОДР) будується для одного ГПА, або групи послідовно з'єднаних ГПА і далі узагальнюється на цех і КС в цілому. При фіксованих умовах всмоктування ОДР являє собою область в координатній сітці (Q_K, ε) , яка містить всі режими відповідного елемента газотранспортної системи, що задовольняють технологічним обмеженням.

При побудові області допустимих режимів ГПА перш за все визначаються значення максимальної і мінімальної комерційної продуктивності $Q_{k \min}$ і $Q_{k \max}$ по формулах:

$$Q_{k \min} = \frac{Q_{\min} \cdot P_{BC} \cdot n_{\min} \cdot 1,1}{2,45 \cdot z \cdot T_{BC}}, \quad Q_{k \max} = \frac{Q_{\max} \cdot P_{BC} \cdot n_{\max}}{2,45 \cdot z \cdot T_{BC}},$$

де Q_{\min} , Q_{\max} – мінімальне і максимальне значення об'ємної витрати газу для одного типу нагнітача (беруться із паспортних даних);

P_{BC} – тиск на вході ГПА;

T_{BC} – абсолютна температура на вході;

n_{\min} , n_{\max} – граничні значення відносних обертів ротора нагнітача.

Інтервал ($Q_{k \min}$, $Q_{k \max}$) розбивається на дискрети, кількість котрих визначається вимогами до точності, одержаних результатів. Для кожної вузлової точки

$$Q_{k \min} \leq Q_{ki} \leq Q_{k \max}, \quad i = 1, \dots, m$$

випикується максимальне і мінімальне допустимі значення ступені стиску газу на виході ГПА

$$\varepsilon_{\max i} = 1 + \frac{n_{i \max}^2 \cdot 13040 (A_0 + A_1 \cdot Q_{BCi} + A_2 \cdot Q_{BCi}^2)}{0,915 \cdot Z \cdot R \cdot T_{BC}}$$

і $\varepsilon_{\min i}$ визначається аналогічно, через $n_{i \min}$,

де Q_{BCi} – значення об'ємної витрати газу, що відповідає комерційній витраті Q_{ki} при заданих P_{BC} , T_{BC} .

A_0 , A_1 , A_2 – коефіцієнти апроксимації стандартної паспортної характеристики нагнітача.

В подальшому обчислюється значення тиску, температури на вході ГПА і потужності, яка споживається нагнітачем для обох точок. Якщо одержані результати задовольняють технологічним обмеженням (1), значення Q_{ki} і відповідні йому ε_{\min} і ε_{\max} запам'ятовуються.

Якщо хоча б одне технологічне обмеження порушено, коректується значення n_i і процедура повторюється.

В тому випадку, коли вдається побудувати значення ε_{\min} і ε_{\max} для трьох і більше значень Q_{ki} , область вважається побудованою. Значення ε_{\min} і ε_{\max} для точок $Q \in [Q_{\min}, Q_{\max}]$, які не вважаються вузловими, добудовуються в найпростішому випадку за допомогою лінійної інтерполяції. При необхідності можна використовувати поліноміальну інтерполяцію.

Для ГПА, оснащених електроприводом, коректування відносних обертів технічно реалізувати неможливо. Тому для таких агрегатів кожному значенню комерційної витрати Q_{ki} , при фіксованих умовах всмоктування може відповідати єдине значення $\varepsilon = \varepsilon(Q_{ki})$ і областю є крива, аналогічна характеристиці агрегату.

Аналогічно тому, як будується ОДР для одного ГПА, область може бути побудована і для групи послідовно з'єднаних агрегатів.

Для розрахунку ступеня стиску на черговому ступені використовуються вихідні значення тиску, температури і об'ємної витрати газу на попередньому ступені, і побудова граничних точок ОДР для багатоступінчатого стиску реалізується за допомогою рекурентної процедури.

На рис. 1 зображено типову ОДР для компресорних агрегатів ГТК-10.

Властивістю, якою після побудови володіють всі ОДР, полягає в тому, що при заданих умовах входу в ГПА кожному допустимому режиму об'єкта (ГПА, цеху або КС в цілому) відповідає деяка точка з області. З іншого боку можна стверджувати, що для довільної точки (Q_K, ε), яка належить ОДР, існує таке значення n (для ГПА) або сукупність значень n_i (для групи або цеху), яке дозволяє одержати на виході об'єкта ступінь стиску газу при значенні вхідної комерційної витрати без порушення технологічних обмежень. Жодна точка, яка не належить ОДР, цією властивістю не володіє. Однак говорити про ізоморфізм між множиною допустимих режимів об'єкту і множиною точок ОДР можна тільки для ГПА, так як, точці ОДР цеху і КС можуть відповідати режими реалізовані при різному розподілі обертів між агрегатами.

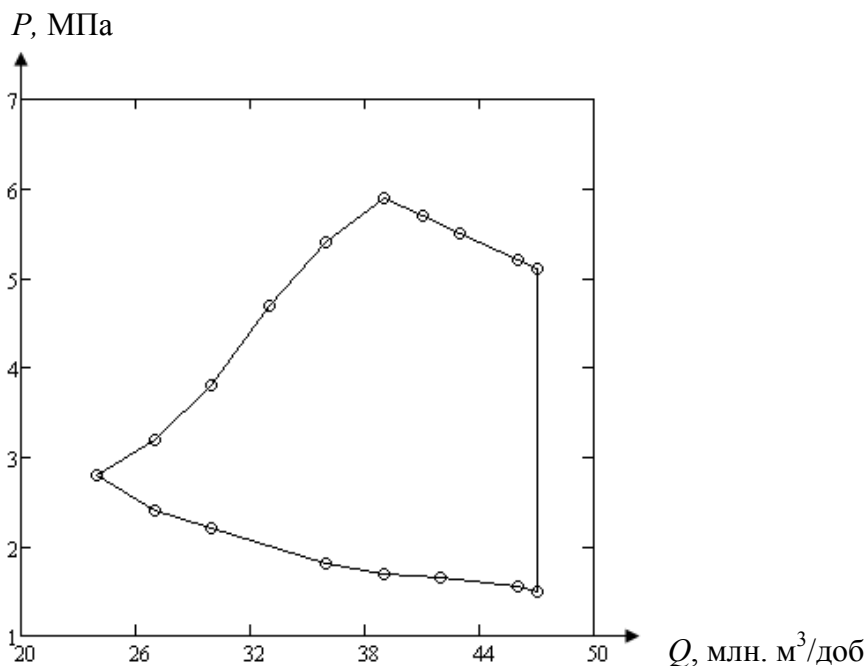


Рис. 1. Побудова для компресорних агрегатів ГТК-10

Переваги ОДР при використанні їх при оптимальному плануванні режимів МГ полягають в тому, що для ряду критеріїв оптимізації, та-

ких як максимум пропускної здатності газопроводу або максимум тисків нагнітання КС, оптимальним режимам відповідають граничні точки областей допустимих режимів. Завдяки цьому в деяких випадках оптимальні режими можна визначати без застосування оптимізації, а в тих випадках, коли без неї не можна обійтися, час виконання оптимізаційної процедури на ЕОМ значно скорочується.

Важливе значення має той факт, що перехід від одного критерію оптимізації до другого у випадку використання ОДР практично не викликає змін не тільки в розрахунковій схемі динамічного програмування, але і в методі розрахунку компресорних станцій. На рис. 2 проілюстровано використання ОДР КС при виборі оптимального режиму КС за критерієм максимуму тиску на виході нагнітача P_H на КС при фіксованій витраті газу $Q_{КС}$. Аналогічно можна використати критерій максимуму пропускної здатності газопроводу при обмеженнях на тиск на виході нагнітача.

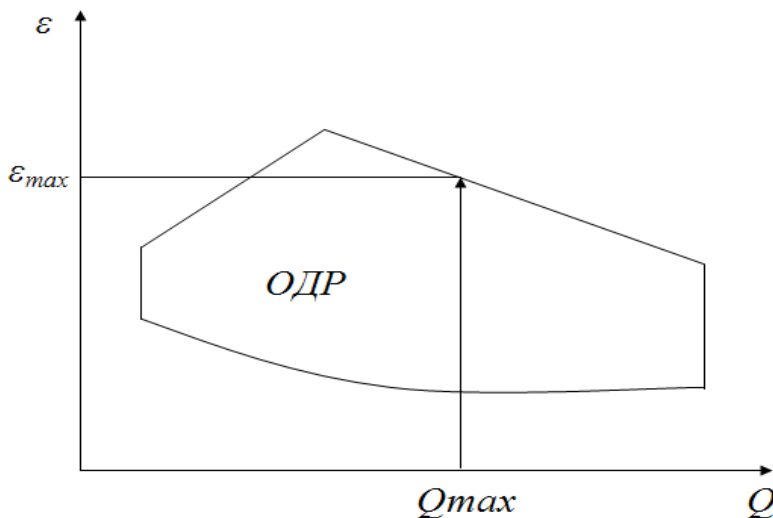


Рис. 2. Використання ОДР при виробі оптимального режиму КС за критерієм максимуму тиску на виході нагнітача

Таким чином, в тих випадках, коли екстремальні значення головного критерію і критеріїв, які виступають обмеженнями, лежать на границі ОДР, перехід від одної постановки багатокритеріальної задачі оптимізації до другої досить простий. Дещо складнішим є випадок, коли екстремальне значення досягається у внутрішній області ОДР. Така ситуація характерна, наприклад, для оптимізації режиму газопроводу за критерієм мінімуму енергозатрат на власні потреби. Розглянемо більш детально розрахунок оптимального за енергозатратами режиму для виконання фіксованого плану поставок.

В цьому випадку за функцію мети можна використовувати сумарну потужність ΣN , що споживається ГПА. Оптимізація здійснюється за допомогою стандартної процедури динамічного програмування.

В сучасних алгоритмах розрахунку багатощаблевих КС з різнотипним обладнанням для розрахунку потужності, яка споживається при фіксованій комерційній витраті газу Q_{KC} і заданій схемі з'єднання агрегатів, спочатку за допомогою ітераційної процедури розраховується розподіл потоків газу по групах, а потім за відомими значеннями відносних обертів на ступенях стиску визначається потужність, яка споживається агрегатом, за формулою

$$N = n_i^3 \cdot \rho (\alpha_0 + \alpha_1 \cdot Q_{BC} + \alpha_2 \cdot Q_{BC}^2 + \alpha_3 \cdot Q_{BC}^3), \quad (2)$$

де n_i – відносні оберти ротора нагнітача;

ρ – густина газу;

Q_{BC} – зведена об'ємна продуктивність агрегату;

$\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ – коефіцієнти апроксимації паспортної характеристики за потужністю для даного агрегату.

Очевидно, що у випадку, коли цехи КС описані за допомогою своїх ОДР, такий алгоритм можна реалізувати тільки для граничних точок області, оскільки для внутрішніх точок реальні значення n невідомі. Тому для обчислення енергозатрат прийнято використовувати термодинамічне співвідношення типу:

$$N_i = \frac{\alpha}{a} Q_{ki} (E^\alpha - 1), \quad (3)$$

де N – потужність, що споживається i -м цехом;

Q_{ki} – комерційна витрата газу через цех;

α – коефіцієнт, який характеризує умови всмоктування.

Коефіцієнти α і a обчислюються за формулами

$$\alpha = \frac{k-1}{\eta \cdot k}; \quad a = \frac{k-1}{k} \eta_{\max},$$

де k – показник адіабати; η – політропний ККД нагнітача;

η_{\max} – механічний ККД, який враховує втрату потужності в підшипниках, редукторі та ін.

В якості значень k, η, η_{\max} беруться, як правило деякі середні величини.

Витрата газу по цехах визначається з наступних співвідношень:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^l Q_{ki} = Q_{kc}; \\ \frac{Q_{ki}}{Q_{i\max} + Q_{i\min}} = const, \end{cases}$$

де l – кількість цехів КС; $Q_{i\min}$ і $Q_{i\max}$ – максимальна і мінімальна витрати газу по i -му цеху за фіксованого ступеня стиску.

$$\text{Звідки} \quad Q_{ki} = \frac{Q_{kc} (Q_{i\max} + Q_{i\min})}{(Q_{i\max} + Q_{i\min})}.$$

Такий метод розрахунку вигідний з точки зору обчислень і знайшов широке застосування на практиці. Однак, обчислене таким чином значення енерговитрат, необхідних для перекачування об'єму газу Q_{kc} зі ступенем стиску ε , практично не залежить від розподілу об'ємів газу по цехах КС і взагалі не є оптимальним. Це вносить деяку похибку в розрахунок значення функції мети, і в кінцевому результаті впливає на вибір режиму газопроводу.

Більш високої точності обчислення функції мети можна досягнути застосувавши наступний алгоритм.

Одночасно з розрахунком граничних точок $\varepsilon_{\min}(Q)$ і $\varepsilon_{\max}(Q)$ при побудові ОДР групи нагнітачів обчислюються також відповідні значення потужності, що споживається $N_{\min}(Q)$, $N_{\max}(Q)$ за формулою (2). Таким чином будується область, яка обмежує значення енерговитрат, що відповідають допустимим режимам об'єкту (рис. 3), тобто вона є граничною областю за енерговитратами (ГОЕ).

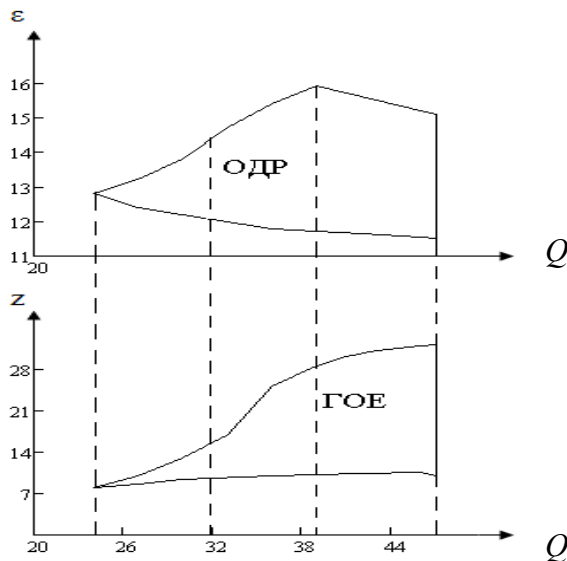


Рис. 3. Побудова ГОЕ компресорного цеху ГТК-10

Встановимо відповідність між областями за допомогою наступного співвідношення при фіксованому Q :

$$N = N_{\min} + \frac{\lg\left(\frac{E}{E_{\min}}\right)(N_{\max} - N_{\min})}{\lg\left(\frac{E_{\max}}{E_{\min}}\right)}, \quad (4)$$

де N – точка ГОЕ, яка ставиться у відповідність точці ОДР з координатами ε і N ;

N_{\min} , N_{\max} , ε_{\min} , ε_{\max} – граничні співвідношення відповідних змінних.

Евристичне співвідношення (4) ґрунтується на припущенні про лінійну залежність між значеннями потужності, що споживається, і логарифму ступені стиску у випадку одноступінчатого і багаступінчатого стискування газу. Доведення цього припущення базується на статичному аналізі регресійного рівняння

$$y = a_0 + a_1x, \quad (5)$$

де $y = N$, $x = \lg \varepsilon$, яке розглядається при фіксованому Q .

В якості критерію був прийнятий рівень статистичної адекватності лінійного регресивного рівняння (5) реальним даним, взятих із журналу стандартних характеристик центробіжних нагнітачів при різних значеннях n (швидкість обертання ротора).

Адекватність регресійної моделі перевірялась за статистичним критерієм Фішера. Приймаючи до уваги те, що при рівні значимості $\alpha = 0,01$ порогове значення критерію Фішера, при якому гіпотеза про адекватність моделі приймається рівною 5,91, можна стверджувати, що лінійний зв'язок між значеннями N , $\lg \varepsilon$ дійсно має місце.

Перевага, яку дає використання співвідношення (4) при розрахунку функції мети полягає в тому, що організувавши відповідний перебір, ми можемо вибрати такий розподіл газу по цехах, якому при фіксованих значеннях ε і Q_{KC} відповідають мінімальні енергозатрати. Якщо на КС експлуатуються три і більше цехів, перебір можна здійснити за допомогою процедури динамічного програмування, вибравши в якості фазової координати значення Q_K . Однак, на практиці така необхідність виникає не часто. Страва в тому, що для цехів, обладнаних нагнітачами з електроприводом, кожному значенню Q_K за фіксованих умов всмоктування відповідає єдиний допустимий режим. Таким чином, перебір необхідно виконувати тільки по цехах, оснащеними ГТУ.

Таким чином, використання областей допустимих режимів у сукупності з граничними областями по енерговитратах, дозволяє вирішувати ті оптимальні задачі, в яких значення енерговитрат входять в функцію мети або в обмеження. Аналогічним чином може бути вирішена задача оптимізації за критерієм мінімуму витрати паливного газу та інші аналогічні задачі.

Це підтверджує висновок про доцільність застосування критичних областей по технологічних параметрах при розв'язанні багатокритеріальних задач оптимізації режиму транспорту газу по магістральних газопроводах.

Якщо при цьому вважати створення бази ОДР першим етапом оптимізації, а вибір оптимального режиму з використанням цих областей другим етапом, то незалежно від того, як поставлена багатокритеріальна задача оптимізації, перший етап є загальним для всіх задач оптимізації, а методи реалізації другого етапу, як правило, співпадають з точністю до алгоритму розрахунку функції мети.

Фактичні режими магістральних газопроводів, як правило, відрізняються від оптимальних планових режимів. Причиною є нестационарність процесу транспорту газу, неповнота інформації про об'єкт керування і зовнішнє середовище на етапі планування, спрощеність моделей, які використовуються в процедурі оптимізації, та ряд інших факторів. Компенсація розбіжностей між фактичними режимами ГТС і плановими здійснюється диспетчерськими службами відповідного рівня на основі оперативної інформації про поточний стан об'єкту і середовища в режимі реального часу. Ця процедура здійснюється до моменту прийняття нового плану, який враховує змінений стан об'єкту керування і навколишнього середовища.

В силу випадкової природи більшості збурень, що визначають фактичний режим газопроводу, дані диспетчерської інформації є випадковими величинами. Тому процедури прийняття рішень, в яких використовуються ці дані, зв'язані з статистичною ідентифікацією об'єкту керування. Врахування нестационарності процесу транспорту газу передбачалось здійснювати за допомогою стохастичної апроксимації режимних параметрів. Однак на практиці алгоритми, які реалізують цей підхід, є надзвичайно громіздкими. Так, наприклад, вони передбачають оцінку щільності розподілу для випадкових величин і використання їх в аналітичних залежностях. Якщо врахувати, що найбільше застосування в практичних задачах знаходить нормальні розподіли, то через складність цього виду функцій аналітичні розв'язки відсутні. Значення функцій задаються таблицями. Тому в реальних умовах, особливо в режимі оперативного диспетчерського керування газопроводами, доцільно використовувати більш прості алгоритми, які базуються на застосуванні методів регресійного аналізу.

Література

1. Трубопроводный транспорт газа / С.А.Бобровский, С.Г.Щербаков, Е.И.Яковлев и др. – М.: Наука, 1976. – 491 с.
2. Трубопроводный транспорт газа / М.П.Ковалко, В.Я.Грудз, В.Б.Михалків та ін. – К.: АренаЕКО, 2002. – 600 с.
- 3.

*Стаття надійшла до редакційної колегії 04.02.2016 р.
Рекомендовано до друку д.т.н., професором Тимківим Д.Ф.,
д.т.н., професором Говдяком Р.М. (м. Київ)*

**OPTIMAL PLANNING OF OPERATIONAL MODES
OF GAS PIPELINE TRANSPORTATION SYSTEMS
UNDER MULTICRITERION CONDITIONS**

Ya. V. Grudz

*Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas;
76019, Ivano-Frankivsk, Carpathians str., 15*

Methods for construction of areas of allowable modes of compressor stations of main gas pipelines as well as construction of marginal areas of energy consumption are presented. It is proposed to use them for optimization of operational modes of gas pipeline transportation system.

Key words: *area of allowable modes, marginal area of energy consumption, mode, optimization*