ТРАНСПОРТ ТА ЗБЕРІГАННЯ НАФТИ І ГАЗУ

УДК 622.691.4(047)

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ ОПТИМІЗАЦІЇ РЕЖИМІВ РОБОТИ БАГАТОНИТКОВИХ ГАЗОТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМ

Д.Ф. Тимків, М.В. Крихівський, Д.Д. Матієшин, В.Д. Яцишин

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел.(03422) 49358,
e-mail: public@nung.edu.ua

Статтю присвячено аналізу та удосконаленню методів оптимізації режимів роботи багатониткових газотранспортних систем. Проаналізовано можливі варіанти постановок задач оптимізації з різними критеріями та методи їх розв'язування. Розглянуто однокритеріальну, компромісну, багатокритеріальну та стохастичну задачі. Класифіковано способи їх розв'язування. Встановлено, що основними проблемами є стійкість методів та знаходження глобального екстремуму. Подолання цих проблем можливе генетичними алгоритмами. Запропоновано чисельний метод випадкового пошуку екстремуму з використанням генетичного алгоритму. Подальше дослідження буде спрямоване на удосконалення способу вибору початкової популяції хромосом, операцій мутації та кроссинговера.

Ключові слова: оптимізація, режими, багатониткові газотранспортні системи, генетичні алгоритми, критерій.

Статья посвящена анализу и усовершенствованию методов оптимизации режимов работы многониточных газотранспортных систем. Проанализированы возможные варианты постановок задач оптимизации с разными критериями и методы их решения. Рассмотрена однокритериальная, компромиссная, многокритериальная и стохастическая задачи. Классифицированы способы их решения. Установлено, что основными проблемами является стойкость методов и нахождения глобального экстремума. Преодоление этих проблем возможно генетическими алгоритмами. Предложен численный метод случайного поиска экстремума с использованием генетического алгоритма. Дальнейшее исследование будет направлено на усовершенствование способа выбора начальной популяции хромосом, операций мутации и кроссинговера.

Ключевые слова: оптимизация, режимы, многониточные газотранспортные системы, генетические алгоритмы, критерий.

The article deals with the analysis and methods improvement of the mode optimization of multithread gas-transport systems operation. The possible versions of putting the tasks of optimization with different criteria and the methods of their solving have been analysed. Onecriterion, compromised, multicriterion and stachostatic tasks are considered. The ways of their solving are classified. It has been determined that methods stability and global extremum finding out are the main problems. Overcoming these problems is possible with the help of genetic algorithms. The numeral method of random search of extremum using genetic algorithm has been offered. Further research will be directed to the improvement of the way of selecting initial chromosomes, operations of mutation and crossing-over.

Keywords: optimization, modes, multithread gas-transport systems, genetic algorithms, criterion.

«Енергетичною стратегією України до 2030 року», розробленою НАК «НафтогазУкраїни», визначено мету й основні напрямки розвитку нафтової та газової промисловості. З-поміж іншого можна виділити:

– стабільне, безперебійне та економічно ефективне задоволення внутрішнього попиту на природний та зріджений газ;

– надійність та безпека газопостачання споживачів;

– збільшення власного добутку газу та зменшення залежності від зовнішнього постачання цього енергоресурсу;

– ефективне використання геополітичного потенціалу України як однієї з найбільших держав, що здійснюють транзит газу;

– інтеграція газотранспортної мережі України до газотранспортної мережі Європи.

Економічно ефективне задоволення внутрішнього попиту на природний та зріджений газ неможливе без ефективного функціонування газотранспортної системи. Для забезпечення економічно ефективного функціонування складної газотранспортної системи необхідне вдосконалення використання комп'ютерної техніки з метою оптимізації режимів її роботи.

Оптимальні режими вибираються за одним або кількома критеріями. На практиці [1] найчастіше використовують критерії мінімуму собівартості перекачування газу, максимуму об'єму перекачування, мінімуму сумарної потужності компресорних станцій, максимуму показників надійності і т.д. Завдання оптимізації зводиться до вибору регульованих параметрів режимів, наприклад, тисків, температур, витрат газу у відповідності з критеріями. Додатково на параметри накладаються технологічні обмеження.

Розв'язування задачі оптимізації режимів роботи багатониткових газотранспортних систем методами математичного аналізу практично неможливе через те, що часто залежність між критеріями оптимальності і шуканими параметрами режиму має емпіричний характер або не має глобального екстремуму. На даний час кращим вважається [1] поєднання кількох методів розв'язування, наприклад методу штрафних функцій та методу випадкового пошуку. З-поміж інших методів можна виділити методи математичного програмування. Проте вони не завжди забезпечують знаходження глобального екстремуму. Тому актуальним є аналіз та удосконалення методів оптимізації режимів роботи багатониткових газотранспортних систем методами математичного програмування.

Метою дослідження є аналіз задач багатокритеріальної оптимізації та методів їх розв'язку, а також розробка методу, який би дав змогу за скінчену кількість кроків знайти розв'язок навіть для задач з багатоекстремальними критеріями та критеріями, простір пошуку для яких є частково нерегулярним.

Загальну задачу оптимізації параметрів технологічного процесу транспортування газу [2] умовно можна поділити на дві частини. Перша – оптимальний розподіл стиснень ε_k між окремими компресорними станціями, друга – визначення раціональних параметрів режиму роботи окремих структурних ланок кожної компресорної станції. Наведемо класичний розв'язок задачі оптимізації усталеного стаціонарного режиму.

Основне рівняння стаціонарного режиму транспортування газу для довільної технологічної ділянки між двома компресорними станціями із m станцій має вигляд:

$$p_{2k-2}^2 - p_{2k-1}^2 = C_{k-1};$$

$$C_{k-1} = \sum_{i=1}^{n_{k-1}} 2A_i l_i (Q_{k-1} - \sum_{i=1}^{n_{k-1}} q_{i-1} + \sum_{i=1}^{n_{k-1}} q_{i-1}^*)^2;$$

$$q_0 = 0; q_0^* = 0; k = \overline{1,m},$$

де: A_i і l_i – загальноприйняті позначення для гідравлічних і геометричних характеристик елемента трубопроводу; n_{k-1} – кількість елементарних технологічних ділянок; q_{i-1} – транзитний відбір, q_{i-1}^* – транзитна подача; Q_{k-1} – кількість газу на виході (k-1)-ої компресорної станції; C_{k-1} – гідравлічна характеристика технологічної ділянки між двома сусідніми компресорними станціями. Цільову функцію можна записати у вигляді:

$$S = \sum_{k=1}^{m} \overline{\delta_k} L_k; \ \overline{\delta_k} = \delta_k \varphi_k; \ L_k = \frac{Q_k^* T_k R_k}{\overline{a_k}} (\varepsilon_k^{a_k} - 1);$$

$$T_k = T_{гр} + (T_{k-1}^* - T_{гр}) e^{-Шу},$$

де: L_k – сумарна потужність компримування k-ої компресорної станції; Q_k^* – масова кількість газу; T_{k-1}^* – температура газу на виході (k-1)-ої компресорної станції з урахуванням охолодження; φ_k – безрозмірний коефіцієнт, який дозволяє врахувати потужність холостого ходу, $\varepsilon_k = p_{2k}/p_{2k-1}$ – ступінь підвищення тиску, δ_k – вартість 1 кВт·год енергії.

Задача оптимізації полягає у знаходженні мінімуму функції S з обмеженнями $\varepsilon_k \geq 1$, $p_{2k\min} \leq p_{2k} \leq p_{2k\max}$, $k = \overline{1,m}$. Розв'язок її можна записати системою рівнянь:

$$\frac{\partial S}{\partial p_{2k}} = \frac{\partial}{\partial p_{2k}} \left\{ \sum_{k=1}^{m} \overline{\delta_k} \frac{Q_k^* T_k R_k}{\overline{a_k}} \left[(\frac{p_{2k}}{p_{2k-1}})^{a_k} - 1 \right] \right\} = 0;$$

$$k = \overline{1,m}.$$

Ця система визначає [2] такий оптимальний розподіл стисків для окремих компресорних станцій:

$$\varepsilon_{k+1} = \left[M_k \varepsilon_k^{a_k} \varepsilon_{2k}^2 \right]^{1/a_{k+1}},$$

де

$$M_k = \frac{Q_k^* T_k R_k \overline{\delta_k} \overline{a_{k+1}} a_k}{Q_{k+1}^* T_{k+1} R_{k+1} \overline{\delta_{k+1}} \overline{a_k} a_{k+1}}; \ k = \overline{1,m}.$$

Описана вище задача є надто спрощеною відносно реальних режимів роботи багатониткових газотранспортних систем. Вона практично непридатна для розрахунку квазістаціонарних та нестаціонарних режимів. Розглянемо постановки більш реальних загальних задач оптимізації.

Для випадку однокритеріальної оптимізації можна записати:

$$\begin{cases} \min f(x) \\ g_j(x) \leq 0, \ j = 1,2,\dots,p \end{cases},$$

де $x=(x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ - вектор незалежних змінних (вектор розв'язку). Тут мінімізується дійсна цільова функція $f(x)$ кількох дійсних змінних x з урахуванням обмежень $g_j(x)$.

Кілька критеріїв оптимізації можна агрегувати у одну функцію. Таку модель називають компромісною. Найбільш відома компромісна модель, у якої цільова функція формується як сума цільових функцій кожного критерію з ваговими коефіцієнтами, тобто:

$$\begin{cases} \max \sum_{i=1}^{m} \lambda_i f_i(x) \\ g_j(x) \le 0,\ j = 1,2,...,p \end{cases},$$

де вагові коефіцієнти $\lambda_1, \lambda_2, \ldots, \lambda_m$ – невід'ємні числа, для яких справедлива рівність

$$\lambda_1 + \lambda_2 + \ldots + \lambda_m = 1.$$

Іншим методом урахування кількох критеріїв у одній цільовій функції є мінімізація віддалі між поточним розв'язком ($f_1(x)$, $f_2(x)$, …, $f_m(x)$) і вектором оптимальних значень функцій $(f_1^*, f_2^*, ..., f_m^*)$, який знаходять для окремих критеріїв оптимізації без урахування інших. Наприклад,

$$\begin{cases} \min(\sum_{i=1}^{m} \lambda_i \left\| f_i(x) - f_i^* \right\|^k)^{1/k} \\ g_j(x) \le 0,\ j = 1,2,...,p \end{cases},$$

де: k – число з інтервалу $[1;\infty[$, а $\lambda_1, \lambda_2, \ldots, \lambda_m$ – коефіцієнти, наприклад $\lambda_i = 1/m$ для $i = 1, 2, ..., m$.

Часто виникають ситуації, коли критерії оптимізації агрегувати в одну цільову функцію недоречно. Це виникає у випадку неспівставлюваних та суперечливих цільових функцій різних критеріїв. Тоді розв'язують таку багатокритеріальну задачу:

$$\begin{cases} \max\left[f_1(x), f_2(x), ..., f_m(x)\right] \\ g_j(x) \le 0,\ j = 1,2,...,p \end{cases},$$

де: $x = (x_1, x_2, \ldots, x_n)^T$ – n-вимірний вектор незалежних змінних, $f_1(x)$, $f_2(x)$, …, $f_m(x)$ – цільові функції m критеріїв, $g_j(x) \le 0$ – система обмежень, $j = 1,2,\ldots,p$.

Якщо цільова функція та обмеження мають стахостичний характер, можна записати задачу однокритеріальної оптимізації:

$$\begin{cases} \max f(x, \xi) \\ g_j(x, \xi) \le 0,\ j = 1,2,...,p \end{cases},$$

де: x – вектор розв'язку, а ξ – випадкова величина. У багатокритеріальному варіанті постановка стахостичної задачі має вигляд:

$$\begin{cases} \max[f_1(x, \zeta), f_2(x, \zeta), ..., f_m(x, \zeta)] \\ g_j(x) \le 0,\ j = 1,2,...,p \end{cases}.$$

Іншим типом стахостичної задачі оптимізації є стахостична задача з імовірнісними обмеженнями. У таких задачах випадкові обмеження задовільняються з ймовірністю, не меншою α. Параметр α трактується як довірчий рівень до значущості обмежень. Для таких задач обмеження записуються у вигляді:

$$\Pr\{g_j(x, \xi) \le 0,\ j = 1,2,\ldots,p\} \ge \alpha,$$

де Pr – ймовірнісна міра.

Для розв'язування задачі однокритеріальної оптимізації розроблено багато методів, які часто називають методами спуску, суть яких полягає у побудові ланцюга точок, кожна із яких покращує значення цільової функції. Їх за способом використання інформації про цільову функцію можна поділити на три класи [3]: прямі методи, градієнтні методи і методи з використанням матриці Гессе. Найчастіше використовуються метод можливих напрямків, метод проекції градієнта, метод штрафних функцій і метод лінійної апроксимації.

Важливими методами розв'язання компромісної задачі оптимізації є методи інтерактивного підходу, який базується на чергуванні фаз прийняття рішення і фаз обчислень. Із них можна виділити [3] метод стиснення допустимої області, метод звужування конуса критеріїв і метод лінійного пошуку.

Для суперечливих критеріїв у багатокритеріальній постановці задачі знайти розв'язок, коли всі функції максимальні, неможливо. У цій ситуації шукають такий вектор розв'язку, для якого зміна будь-якої із його компонент призводить до погіршення значення цільової функції одного або кількох інших критеріїв. Такий вектор називають ефективним, непокращуваним або рішенням за Паретто.

Способи розв'язання задач оптимізації режимів роботи багатониткових газотранспортних систем у багатокритеріальній постановці можна класифікувати за [3]:

1) способи з використанням симплекс-методу, наприклад метод сепарабельного програмування, метод апроксимуючого програмування, методи квадратичного цільового програмування. Основна ідея цих способів полягає у перетворенні нелінійної моделі в набір апроксимуючих лінійних задач;

2) способи, що базуються на використанні прямого пошуку, в тому числі метод пошуку за зразком і градієнтом. У цих способах нелінійна багатокритеріальна задача перетворюється на набір однокритеріальних задач, які розв'язуються методами для однокритеріальних задач;

3) способи, що використовують градієнти. В цих способах градієнт обмежень визначає можливий напрям, після чого задача розв'язується методом допустимих напрямів;

4) ітерактивні способи, в яких беруть участь люди для прийняття рішення в процесі оптимізації;

5) генетичні алгоритми. Ці методи уможливлюють розв'язання широкого спектру задач зі складними нелінійними моделями.

Генетичні алгоритми відносять до методів випадкового пошуку розв'язання задач оптимізації. Вони зарекомендували себе як ефективний засіб для розв'язування задач багатокритеріальної оптимізації, цільові функції яких є багатоекстремальними або простір пошуку є частково нерегулярним. Найголовнішою перевагою цього методу є досягнення дійсного глобального екстремуму.

Хромосома є основним елементом цього методу. Це – вектор, який зіставляється з розв'язком задачі оптимізації. Набір хромосом називають популяцією. Початкову популяцію можна сформувати, виходячи з технологічних міркувань або випадковим чином.

Для хромосом вводиться міра пристосовуваності, яка використовується у процесі відбору хромосом у нову популяцію. Перехід від однієї популяції до нової називають поколінням. У кожному новому поколінні всі хромосоми модифікуються за допомогою механізмів кроссинговера і мутації. У кожному новому поколінні вибирається найкраща хромосома. Із найкращої хромосоми всіх поколінь (заданої кількості циклів) знаходиться розв'язок задачі оптимізації.

Усі утворювані хромосоми повинні перевірятись на відповідність обмеженням. Для цього можна використати циклічну перевірку $g_j(V)\leq 0$ для $j=1,2,\ldots,p$, де V- хромосома. Вибір початкової популяції також повинен пройти перевірку потрапляння хромосом у область допустимих значень. Її утворення можливе випадковим генеруванням. Якщо ж відоме хоча б одне допустиме значення, тоді можна використати такий алгоритм [3].

Допустиме початкове значення розв'язку задачі оптимізації позначимо як V_0. Задамо числове значення M як міру розсіювання породжуваних хромосом $x\in\Re^n$. Випадковим чином вибираємо напрям d в $\Re^n$. Нову хромосому знаходимо як $V_0+M\cdot d$, якщо вона відповідає обмеженням. В протилежному випадку змінюємо число M на випадкове число, яке знаходиться між числами 0 і M. Цей процес повторюємо до повного формування популяції.

Операція кроссинговера використовує дві батьківські хромосоми для утворення двох нових хромосом. Вибір батьківських хромосом можна виконати визначивши ймовірність кроссинговера P_c. У циклі для кожної хромосоми генеруються випадкові числа з відрізку [0;1]. Якщо це число менше P_c, тоді відповідна хромосома стає батьківською. Вибрані у такий спосіб хромосоми об'єднуються попарно, і з них утворюютья нащадки X і Y, наприклад із V_1 і V_2:

$$X=c\cdot V_1+(1-c)\cdot V_2,\quad Y=(1-c)\cdot V_1+c\cdot V_2,$$

де c – випадкове число із відрізку [0;1]. Якщо нащадки не відповідають обмеженням оптимізації, тоді змінюється число c.

Ще одна операція модифікації хромосоми - мутація - виконується для вибраних у такий самий спосіб хромосом, як і для кроссинговера. Мутацію хромосоми V можна записати:

$$X=V+M*d,$$

де: M – випадкове число, а d – випадковий напрям в $\Re^n$, які задаються так, як і у створенні початкової популяції.

Популярним методом розв'язання стохастичної задачі є використання моделей очікуваного значення. У цих моделях цільова функція й обмеження змінюють математичним очікуванням. Для багатокритеріальної задачі модель має вигляд:

$$\begin{cases}\max\{E[f_1(x,\zeta)],E[f_2(x,\zeta)],\ldots,E[f_m(x,\zeta)]\}\\ E[g_j(x)]\leq 0,\ j=1,2,\ldots,p\end{cases},$$

де: $x=(x_1, x_2, \ldots, x_n)^T$ – n-вимірнй вектор незалежних змінних, ξ – випадкова величина, $E[f_1(x,\xi), f_2(x,\xi),\ldots, f_m(x\xi)]$ – математичне очікування цільових функцій m критеріїв, $E[g_j(x,\xi)]\leq 0$ – система математичних сподівань обмежень, $j=1,2,\ldots,p$. Таку задачу можна розв'язати, наприклад методом Монте Карло.

Висновок

Як бачимо, для оптимізації режимів роботи багатониткових газотранспортних систем універсальним методом розв'язку багатокритеріальної задачі можна вважати генетичні алгоритми. Такий метод при скінченій кількості поколінь та скінченому об'ємі популяції забезпечує знаходження глобального екстремуму з заданою точністю. Запропонована модель оптимізації дозволяє ефективно розв'язувати задачу оптимізації для оперативного керування режимами газопроводів.

Наступним етапом досліджень буде удосконалення способу вибору початкової популяції, операцій мутації та кроссинговера, функції адаптування. Також необхідно провести чисельні дослідження для діючих баганиткових газотранспортних систем.

Література

1 Ковалко М.П. Трубопровідний транспорт газу / [М.П.Ковалко, В.Я.Грудз, В.Б.Михалків та ін.]. – Київ: Агентство з раціонального використання енергії та екології, 2002. – 600 с.

2 Темпель Ф.Г. Оптимальные параметры технологического процесса транспорта газа для экплуатирующейся трубопроводной системы / Ф.Г.Темпель, В.М.Маслов. – Л.: Недра, 1970. – 128 с.

3 Лю Б. Теория и практика неопределенного программирования / Б.Лю; пер. с англ. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2005. – 416 с.

Стаття надійшла до редакційної колегії 08.02.11

Рекомендована до друку професором ***В.Я. Грудзом***