

О.В. Алпатов

(Україна, Кривий Ріг, ВАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»)

ОПТИМІЗАЦІЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ РЕЖИМІВ ГРУПИ КОМПРЕСОРІВ ПРИ РОБОТІ НА ЗАГАЛЬНУ МАГІСТРАЛЬ

Проблема і її взаємозв'язок з науковими або практичними завданнями

Перед розробниками математичних моделей будь-якої електромеханічної системи завжди стояла протирічна проблема. З одного боку, потрібно якомога детальніше описати об'єкт досліджень, урахувати його властивості і індивідуальні особливості. З другого боку, потрібно вводити деякі припущення для зведення математичної моделі до вигляду, реального з точки зору втілення в життя.

На сучасному етапі розробники систем мають можливість застосовувати в них потужні мікроконтролери (МК) і пакети прикладних програм, котрі дозволяють розрахувати на персональних ЕОМ майже будь-яку задачу з області автоматизації. Але при програмуванні МК математична потужність ЕОМ повинна бути замінена на якісь чисельні методи пошуку розв'язків, котрі можуть бути реалізовані тим чи іншим МК.

Для розробників саме систем електромеханіки механічна частина завжди є так би мовити *terra incognita*, оскільки для кожного впровадження потрібно вивчити свої нефахові для електриків особливості. Це потребує втручання в сферу механіки й інших наук про механізми і машини. Механізм для електриків найчастіше – це тільки навантаження для електрочастини, але його поведінка повністю змінює роботу електроприводів (ЕП) і систем електромеханіки і її слід вивчати.

Виробництво стислого повітря (СП) в нашій країні займає дуже важливе і енергетичноємке місце. У гірничій і металургійній галузях на його виробництво витрачається десятки відсотків споживаної електроенергії [1]. Тому розробка алгоритмів оптимізації енергоспоживання компресорних станцій (КС), котрі мають працюючі групи відцентрових компресорних машин (ВКМ) із загальною магістраллю, є актуальною і потрібною.

Аналіз досліджень і публікацій

На сучасному етапі всі середні й великі виробництва оснащуються потужними централізованими КС [2], на яких застосовуються електричні (синхронні) або парові приводи. Потужність одиниць електричного приводу досягає 10-12 МВт. Такий підхід до організації доставки СП дає змогу знизити питому вартість одиниці виробленого СП і значно підвищити його надійність. З іншого боку, при таких одиничних потужностях застосування регульованого ЕП має тривалий термін окупності, що не завжди прийнятно в умовах приватної власності на засоби виробництва.

Структура споживачів на потужних виробництвах має розподілений і випадковий характер [1], що робить потрібним постійне регулювання продуктив-

ності або тиску на виході з КС шляхом зміни положення регулюючих органів (РО).

Існують різні способи регулювання продуктивності групи ВКМ. З метою зменшення коливань у системі одночасно змінюють положення усіх РО [3]. При наявності ВКМ з різною потужністю регулюють більш потужні в межах зміни продуктивності менш потужних, при досягненні мінімальної вимикають один з менших [4]. Вибирають «головну» машину, з якої послідовно змінюють положення регулюючих органів в КС за чергою [5]. Всі ВКМ працюють у номінальному режимі крім одної, за допомогою якої і підтримують потрібний тиск у магістралі [6]. Не дуже прийнятний для потужних ВКМ спосіб вимкнення (увімкнення) при потребі [7].

Постановка завдання

При такому розмаїтті способів регулювання продуктивності КС потрібно запропонувати і математично обґрунтувати один з найбільш енергетично ефективний, при якому вартість одиниці виробленого СП буде мінімальною. Для цього потрібно з'ясувати взаємозв'язки між основними параметрами ВКМ у вигляді простої і наявної математичної моделі.

При роботі групи компресорів КС на загальну магістраль існують два основних напрями, за якими можливе впровадження технологій енергозбереження: механічний і електричний. В роботі буде розглянуто механічні засади зниження енерговитрат при роботі групи з n компресорів на загальну магістраль з метою визначення можливого алгоритму управління кількісними і якісними показниками СП як вихідного продукту КС.

Викладення матеріалу і результати

У подальшому буде розглядатися робота ВКМ, їх сумісна продуктивність при кількості n із загальною магістраллю. Основними характеристиками, котрі описують взаємозв'язки між головними параметрами відцентрових компресорних машин, є залежності: тиску H , потужності N та коефіцієнту корисної дії (к.к.д.) η від продуктивності F [1], котрі називаються аеродинамічними характеристиками АДХ. Реальні АДХ отримують безпосереднім заміром H , N і F для діапазону змін продуктивності від 0 до \max при однаковій швидкості обертання валу і положенні РО на нагнітанні. Загальний вигляд таких кривих показано на рис. 1: опт. – оптимальні значення F і H , при яких ККД максимальний, кр. – критичні значення продуктивності і тиску, при виході за межі яких можливий режим помпажу і нестійкої роботи.

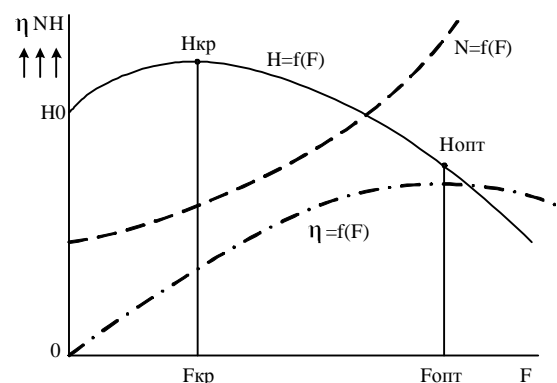


Рис. 1. Основні характеристики ВКМ

У номінальному режимі ВКМ працює в точці оптимуму. Але для нормального функціонування споживачів потрібні параметри СП, котрі відрізняються від номінальних. Найчастіше потрібно підтримувати сталим тиск, рід-

ше – сумарну продуктивність КС (наприклад, при роботі на домену піч). Тоді використовуються режими з регулюванням продуктивності КС.

У загальному випадку для ВКМ з однією аеродинамічною схемою використовують безрозмірні АДХ [8]. Їх зведення до вигляду, котрий відповідає конкретній ВКМ, можливе при застосуванні спеціальних коефіцієнтів. Наприклад, для ВКМ К905-61-1 вони мають вигляд як на рис. 2. Жирною пунктирною лінією показано АДХ, котрі відповідають положенню регулюючого органу на всасі ВКМ при завданні по тиску в магістралі $H_{зад}$, отримати які можна по методиці [1].

Аналіз зовнішнього вигляду кривих рис. 2 виявив, що для їх коректної апроксимації можна застосувати поліноми вигляду

$$x = \sum_{i=0}^m a_i \cdot y^i, \quad (1)$$

де m – ціле число, a_i – коефіцієнти. У даному випадку для систем автоматичного управління вистачить 4 ступеня поліномів. Тоді, наприклад, для потужності

$$N = a_0 + a_1 F + a_2 F^2 + a_3 F^3 + a_4 F^4. \quad (2)$$

Таким чином маємо чіткі формули залежностей $H = f(F)$, $h = f(F)$ і $N = f(F)$ для визначення взаємозв'язків між основними параметрами ВКМ. Апроксимація даних залежностей не представляє складності і може бути проведена за допомогою поліноміальної сплайн інтерполяції [9]. Потрібна кількість вузлів інтерполяції визначається ступенем m і складає 5 точок. Діапазон зміни продуктивності визначається з більшої сторони технічними можливостями ВКМ, з меншої – зоною нестійких режимів (помпажні режими).

При роботі ВКМ бажано було б оцінити взаємозв'язок між кількісними, якісними і вартісними характеристиками її роботи, якими можуть ви-

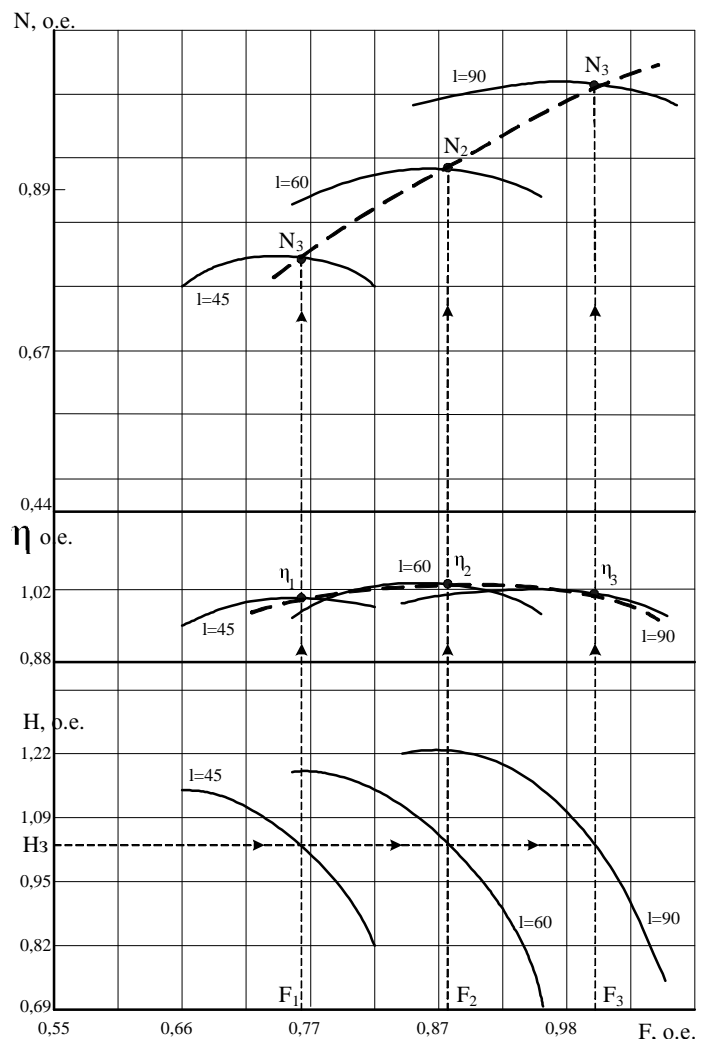


Рис. 2. Безрозмірні АДХ компресора К905-61-1

ступити, в даному випадку, продуктивність, тиск і потужність на валі відповідно. Потужність зв'язана з вартістю наступним чином:

$$V = C_p \cdot N, \quad (3)$$

де V – вартість роботи ВКМ; C_p – вартість одного кіловата електроенергії.

Для такого аналізу потрібна залежність виду $N = f(H, F)$. Її отримання стане можливим після застосування тримірної апроксимації за методом найменших квадратів. Його використання обумовлено гладким характером залежності $N = f(F)$. При другому ступені поліному залежність матиме такий вигляд:

$$N = a_0 + a_1 F + a_2 F^2 + b_0 + b_1 H + b_2 H^2, \quad (4)$$

чого досить для якісної оцінки наведеної поверхні.

Важливим моментом при отриманні коефіцієнтів є вибір вузлів інтерполяції. В даному випадку їх потрібно 6 і автори пропонують три цілих значення тиску, котрі будуть потрібні при реальній роботі ВКМ (тобто будуть обраховуватися три криві $N = f(H, F)$, котрі відповідають цим значенням тиску) і 6 значень продуктивності, по два на кожне значення тиску. Отримана поверхня (рис. 3) дозволяє зробити висновки про зменшення вартості роботи ВКМ при зменшенні потрібних тиску або продуктивності.

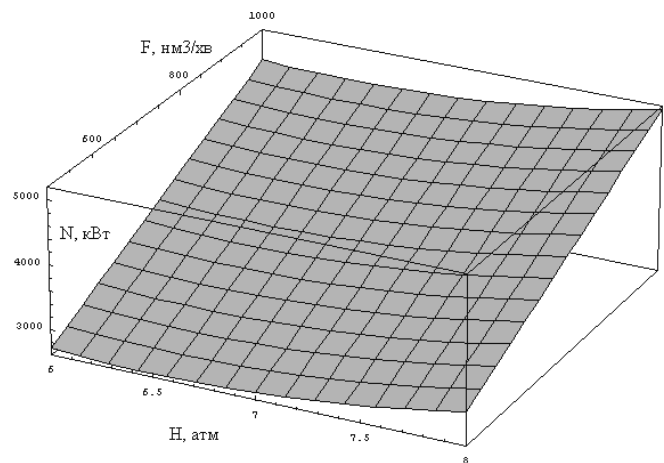


Рис. 3. Поверхня, відповідна до залежності $N = f(H, F)$

При роботі групи ЦКМ на загальну магістраль з метою підтримання сталого завданого тиску потрібно постійно змінювати кути положення РО. Перераховані вище методи пропонують часні випадки, тому потрібно запропонувати алгоритм, при якому вибір положень РО призведе до мінімальної сплати за споживану електроенергію при виконанні потреб технології. Основною технологічною умовою роботи КС є

$$F_S = \sum_{i=1}^n F_i, \quad (5)$$

тобто сумарна продуктивність має бути сталою для фіксованого на даний момент часу аеродинамічного опору магістралі. Зведений до вигляду поліномів вираз (5) має наступну форму:

$$F_S = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0}^k (c_{ji} \cdot l_i^j), \quad (6)$$

де l – кут відкриття РО; c – коефіцієнти залежності $F_i = f(l_i)$. При пошуку мінімуму функції $N = f(l_1, l_2 \dots l_i)$ вираз (6) є обмеженням, яке потрібно врахувати при розрахунках.

Зазвичай для пошуку екстремуму функції застосовують чисельні методи, наприклад Хука-Дживса, [10]. Але його використання потребує перетворення обмеження (6) до вигляду

$$l_i = h(l_1, l_2 \dots l_{n-1}), \quad (7)$$

і т.д., що неможливо зробити.

Для визначення методу пошуку мінімуму функції $N = f(l_1, l_2 \dots l_i)$ проаналізуємо вигляд поверхні $N = f(l_1, l_2)$ для ВКМ К905-61-1 і К900-31-2 (рис. 4), що дозволяє зробити висновок про відсутність саме екстремуму функції і про наявність якогось мінімального значення потужності (і вартості відповідно). Таким чином, найбільш прийнятним і доступним способом пошуку мінімуму функції $N = f(l_1, l_2, \mathbf{K} l_i)$ є перебір значень кутів РО з урахуванням (6), при тому що реальне значення i не становить більше 6-8 штук. За початкові значення доцільно взяти значення повністю відкритих РО, а за крок руху Δl значення в 1%.

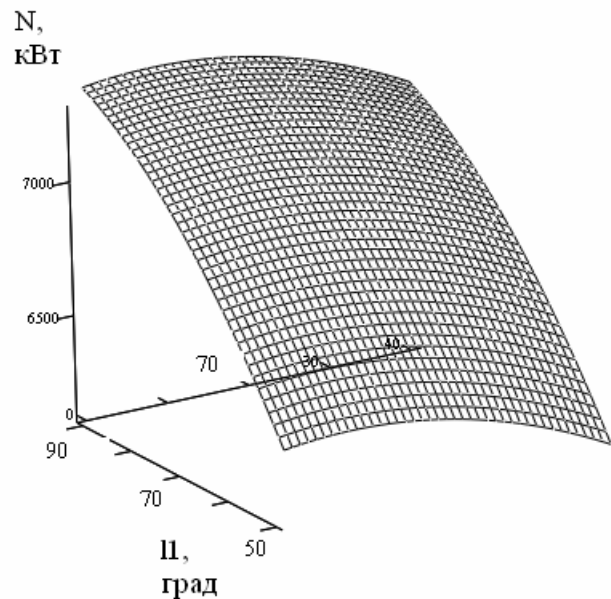


Рис. 4. Поверхня, що відповідає залежності $N = f(l_1, l_2)$

При віртуальній імітації паралельної роботи вказаних ВКМ К905-61-1 і К900-31-2 отримано такі результати. При зміні потрібної сумарної продуктивності від 1300 до 1900 $\text{nm}^3/\text{год}$ значення кутів відкриття РО, котрі відповідають мінімальній споживаній потужності, постійно змінюються. При цьому вони практично ніколи не співпадають, що дає змогу зробити висновок про неоптимальність одночасного однакового регулювання положення РО. Економія електроенергії при підтриманні заданої продуктивності від використання запропонованого алгоритму досягає 5%, що при вказаних потужностях ВКМ є досить вагомим результатом.

Висновки і напрямки подальших досліджень

У роботі наведений шлях математичної ідентифікації основних залежностей, котрі характеризують роботу ВКМ. Запропоновано алгоритм встановлення положення РО на всасі ВКМ з метою підтримки потрібної продуктивності групи компресорів з мінімумом споживаної потужності і відповідно мінімумом собівартості СП. Це дає змогу зменшити кількість споживаної потужності до 5% без застосування додаткових технічних засобів.

Список літератури

1. Мелькумов Л.Г., Найман А.Е., Травкин Е.К. Автоматизация пневматического хозяйства шахт и рудников. – М.: Недра, 1977. – 271 с.
2. Корнев В.М. О необходимости создания районных кислородных станций // Пром. энергетика. – 1979. – №6. – С. 17-18.
3. Способ регулирования давления в напорном коллекторе компрессорной станции: А.с. 1249201 СССР, МКИ F 04 D 27/00.
4. Способ плавного регулирования производительности компрессорных станций магистральных газопроводов: А.с. 1564397 СССР, МКИ F 04 D 27/00.
5. Старосельский Н.В., Рутштейн А.Л., Ратнер Ф.А., Гордон И.З. Автоматическое регулирование давления в нагнетательном коллекторе турбокомпрессорной станции // Пром. энергетика. – 1971. – №11. – С. 26-30.
6. Назаренко У.П. Экономия электроэнергии в компрессорных установках. – М.: Госэнергоиздат, 1961. – 75 с.
7. Петросов И.М. Из опыта автоматического регулирования давления сжатого воздуха // Пром. энергетика. – 1960. – №1. – С. 32-33.
8. Алексеев В.В. Рудничные насосные, вентиляторные и пневматические установки: Учебн. пособие для вузов. – М.: Недра, 1983. – 381 с.
9. Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М. Численные методы. – М.: Бинوم, 2006. – 636 с.
10. Банди Б. Методы оптимизации. Вводный курс: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1988. – 128 с.