

10. Гаврилов, П.Д. Структура системы управления многоприводным ленточным конвейером / П.Д. Гаврилов, А.П. Носков // Электротехника, – 2009, №5 – с. 17–21.

11. Прокуда В. М. Энергоэффективность магистрального конвейерного транспорта вугільних шахт з урахуванням динаміки вантажопотоків : автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.09.03 "Електротехнічні комплекси та системи" / М-во освіти і науки України, Держ. вищий навч. закл. "Нац. гірн. ун-т". – Дніпропетровськ : НГУ. – 2015. – 20 с.

*Рекомендовано до друку: д-ром техн. наук, проф. Випанасенко С.І.*

УДК: 621.3.078.4: 621.512

**А.В. Бобров канд.техн.наук**

(Україна, Днепр, Государственное ВУЗ "Национальный горный университет")

### **РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА МЕТОДОВ РЕШЕНИЯ ОПТИМИЗАЦИОННОЙ ЗАДАЧИ СИСТЕМЫ «ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СЕТЬ – ПРИВОД – КОМПРЕССОР – ПНЕВМОСЕТЬ»**

**Анотація.** В роботі визначені вимоги при формуванні математичної моделі, що дозволяє визначити оптимальний режим роботи системи виробництва і розподілу стислого повітря, що складається з наступних елементів "електрична мережа - привід - компресор - пневмомережа". Розглянуто питання про обмеження кількості пусків, яке вводиться для створення режиму роботи приводу згідно його паспортним даним. Зроблено аналіз методів розв'язання оптимізаційної задачі системи «електрична мережа - привід - компресор - пневмосети», з урахуванням особливостей математичної моделі. З розглянутих методів одновимірної оптимізації - сканування, половинного ділення і золотого перетину, найкращим є метод сканування, так як зміна параметра, що оптимізується  $P_2$  відбувається зі змінним кроком, що поєднується з вимогами, що пред'являються до цього параметру математичною моделлю.

**Ключові слова:** електропривод, регулювання, компресор, електромеханічна система.

**Аннотация.** В работе определены требования при формировании математической модели, позволяющей определять оптимальный режим работы системы производства и распределения сжатого воздуха, состоящей из следующих элементов "электрическая сеть – привод – компрессор – пневмосеть". Рассмотрен вопрос об ограничении количества пусков, которое вводится для создания режима работы привода согласно его паспортным данным. Произведен анализ методов решения оптимизационной задачи системы «электрическая сеть – привод – компрессор – пневмосеть», с учетом особенностей математической модели. Из рассмотренных методов одномерной оптимизации – сканирования, половинного деления и золотого сечения, наиболее предпочтительным является метод сканирования, так как изменение оптимизируемого параметра  $P_2$  происходит с переменным шагом, что сочетается с требованиями, предъявляемыми к этому параметру математической моделью.

**Ключевые слова:** электропривод, регулирование, компрессор, электромеханическая система.

**Abstract.** The requirements for the formation of a mathematical model allowing to determine the optimum operating mode of the compressed air production and distribution system consisting of the following elements "electric network - drive - compressor - pneumatic network" are defined in the work. The issue of limiting the number of launches, which is introduced to create the operating mode of the drive according to its passport data, is considered. The analysis of the methods for solving the optimization task of the system "electric network - drive - compressor - pneumatic system", taking into account the features of the mathematical model. Of the considered methods of one-dimensional optimization - scanning, half-division and golden section, the scanning method is most preferable, since the change in the optimized parameter  $P_2$  occurs with a variable step, which is combined with the requirements imposed on this parameter by a mathematical model.

**Keywords:** electric drive, control, compressor, electromechanical system.

**Введение.** Система двухпозиционного регулирования давления широко применяется в поршневых компрессорных установках. Нормальная работа потребителей сжатого воздуха обеспечивается благодаря поддержанию в системе давления в заданном интервале ( $P_{min} \div P_{max}$ ).

Повышения энергоэффективности системы "электрическая сеть – компрессор – пневмосеть" в целом можно достичь, выполнив "плавающим" верхний уровень давления. В работе [1] введен критерий экономичности для системы управления и определения значения верхнего уровня давления на одном

цикле накачки спуска давления – КПД. Обоснование этого энергетического показателя базируется на выяснении зависимостей между различными показателями элементов всей системы, определении наиболее весомых, с точки зрения потерь энергии, элементов электромеханической системы, а также взаимосвязи между ними.

В [2] были установлены зависимости между измеряемыми параметрами и потерей мощности в различных элементах комплекса с учетом существующих связей между ними, которые позволяют исследовать реальную картину изменения потерь при различных режимах работы технологического оборудования. Предложено производить сравнение потерь в различных элементах электротехнического комплекса в виде потерь энергии, что наиболее правильно с энергетической точки зрения. Энергию, потребляемую приводом компрессора, можно представить в виде:

$$\mathcal{E} = \sum_{i=1..T} N_i \cdot t_i \quad (1)$$

где  $N_i$  - потребляемая мощность приводом компрессора, кВт.;  $t_i$ - интервал дискретизации, ч.

Здесь важно правильно выбрать этот интервал. В таком случае упрощаются расчеты по определению потерь энергии в элементах электротехнического комплекса, так как производить вычисления в виде суммирования потерь мощности менее ресурсоемко с точки зрения вычислительной мощности управляющей системы.

Следующим шагом стало формирование математической модели, позволяющей определять оптимальный режим работы оборудования системы. Так как элементы электромеханической системы существенно отличаются друг от друга, например, электрическая и пневматическая сети, и, соответственно, различными являются их параметры, выработан единый подход для анализа их энергетических показателей, что позволило унифицировать параметры режимов работы элементов электромеханической системы и создало предпосылки для объективного и точного определения критерия управления.

Таким образом созданы все условия для постановки задачи условной параметрической оптимизации, с одним оптимизируемым параметром  $P_{\max}$ , определяющим максимальный уровень КПД электромеханической системы за цикл, при различных расходах сжатого воздуха, потребляемого пневмоприемниками.

Поскольку речь идет о решении оптимизационной задачи, то модель включает критерий оптимальности, представленный в виде аналитической функции (целевой).

$$F_{opt}(X) = \eta(P_{\max opt}) \rightarrow \max \quad (2)$$

**Постановка задачи.** Определение зависимости, связывающей уровни расхода сжатого воздуха с показателем КПД системы в целом, является основной задачей (целью) разработанной математической модели. Это дало возможность проследить режимную взаимосвязь элементов комплекса и получить результаты в аналитическом и графическом виде. Анализ этой зависимости произведен с точки зрения определения момента времени выработки управляющего воздействия на асинхронный привод поршневой компрессорной установки. Поскольку математическая модель ориентирована на оперативное управление, и контролируемые параметры режимов сведены к минимуму, то установлена зависимость между контролируемыми параметрами и показателем КПД. Особенность построения такой зависимости заключается в необходимости обеспечения наглядности представления данных для определения оптимальных параметров режима работы электромеханической системы. Эти параметры обеспечивают максимум КПД. Управляющие воздействия вырабатываются в момент времени, который соответствует оптимальным параметрам режима работы электромеханической системы. Это позволило получить максимальное значение показателя КПД а, следовательно, определить оптимальные параметры режима работы электромеханической системы на заданном интервале времени.

Предложенная математическая модель позволяет определить момент создания управляющего воздействия на асинхронный привод поршневой компрессорной установки. Для обеспечения адекватности разработанной модели необходимо принять и обосновать допущения и ограничения.

Математическая модель учитывает режимы работы всех звеньев электротехнического комплекса для определения его энергетического показателя – КПД и определяет оптимальное значение верхнего предела уровня давления  $P_{opt}$  за цикл спуска – накачки при условии максимума КПД электротехнического комплекса – минимума потерь энергии в его звеньях.

При этом ограничениями для математической модели являются:

- условие по обеспечению пневмоприемников сжатым воздухом.
- ограничение по количеству пусков приводного асинхронного двигателя в час (защита асинхронного двигателя от перегрева).

Модель розроблена виходячи з наступних допущень:

- напруга живлення асинхронного двигателя незмінно  $U = \text{const}$ ;

- виходячи з аналізу робочої характеристики  $\eta = f\left(\frac{N}{N_{\text{ном}}}\right)$  асинхронних приводів компресорів

роботаючих на навантаження, значення КПД при коефіцієнті завантаження більшому 0,3 – 0,4 залишається практично незмінним і рівним  $\eta_{\text{ном}}$  [3], так як коефіцієнт завантаження асинхронних приводів поршневих компресорів змінюється від 0,6 до 0,9 при їх роботі на проміжку тиску від  $P_{\text{мін}}$  до  $P_{\text{макс}}$  системи двохпозиційного регулювання;

- вплив температур всмоктування повітря на споживану потужність вважається несуттєвим і може не враховуватися;

- розрахунок повинен виконуватися за параметрами при  $T_1 = 20$  °С, так як зниження температури всмоктуваного повітря з постійним рівнем тиску зменшує кількість водяних парів, що містяться в ньому, що призводить до підвищення продуктивності [4].

**Рішення задачі.** Обмеження  $W_i(\bar{X})$ , накладувані на область існування оптимізуваного параметра [5,6]. Рішення оптимізаційної задачі повинно бути знайдено при тиску в пневмосистемі  $P_{\text{мін}} \leq P_2 \leq P_{\text{макс}}$ . А так як раніше було сказано, що математична модель повинна враховувати умови забезпечення пневмоприймачів стиснутим повітрям і обмеження по кількості пусків приводного асинхронного двигателя в годину (захист асинхронного двигателя від перегріву), то в задачу параметричної оптимізації необхідно ввести також обмеження:

$$P_{\text{мін}} < P_{\text{макс опт}} \leq P_{\text{макс}} \quad (3)$$

Оптимальний (максимальний) верхній рівень тиску в пневмосистемі  $P_{\text{опт}}$  повинен встановлюватися в інтервалі тисків від  $P_{\text{мін}}$  до  $P_{\text{макс}}$ . Кількість пусків визначає мінімальну тривалість циклу.

$$M \leq M_{\text{паспорт}}; T_{\text{thz min}} = \frac{60}{M} \quad (4)$$

Таким чином сформульована задача умовної оптимізації з одним оптимізуваним параметром ( $P_{\text{макс}}$ ), визначаючим оптимальний (максимальний) КПД електромеханічної системи за цикл, виходячи з його конкретних параметрів, режимів роботи, обмежень і допущень.

Для рішення задачі умовної оптимізації з одним оптимізуваним параметром  $P_2$ , визначаючим оптимальний рівень КПД електромеханічної системи при різних витратах стиснутого повітря, споживаного пневмоприймачами, необхідно було провести аналіз методів одномерної оптимізації, щоб вибрати найбільш прийнятний.

З цією метою нижче розглядається ряд одномерних методів пошуку, орієнтованих на знаходження точки оптимума всередині заданого інтервалу. Методи пошуку, які дозволяють визначити оптимум функції однієї змінної шляхом послідовного виключення підінтервалів і, відповідно, шляхом зменшення інтервалу пошуку, носять назву методів виключення інтервалів.

Функція  $f(x)$  є унімодальною на відрізку  $[a, b]$  в тому і тільки в тому випадку, якщо вона монотонна по обидві сторони від єдиної на розглянутому інтервалі оптимальної точки  $x^*$ .

Унімодальність функцій є виключно важливим властивістю. Фактично всі одномерні методи пошуку, що використовуються на практиці, базуються на припущенні, що досліджувана функція в допустимій області, по крайній мірі, має властивість унімодальності. Корисність цього властивості визначається тим фактом, що для унімодальної функції  $f(x)$  порівняння значень  $f(x)$  в двох різних точках інтервалу пошуку дозволяє визначити, в якому з заданих двох вказаних точками підінтервалів точка оптимума відсутня.

Правило виключення інтервалів гласить: нехай функція  $f$  унімодальна на замкнутому інтервалі  $a \leq x \leq b$ , а її мінімум досягається в точці  $x^*$  [7, 8]. Розглянемо точки  $x_1$  і  $x_2$ , розташовані в інтервалі таким чином, що  $a < x_1 < x_2 < b$ . Порівнюючи значення функції в точках  $x_1$  і  $x_2$ , можна зробити наступні висновки:

- 1) Если  $f(x_1) > f(x_2)$ , то точка минимума  $f(x)$  не лежит в интервале  $(a, x_1)$ , т.е.  $x_* \in (x_1, b)$ .
- 2) Если  $f(x_1) < f(x_2)$ , то точка минимума не лежит в интервале  $(x_2, b)$ , т.е.  $x_* \in (a, x_2)$ .

Согласно приведенному выше правилу исключения интервалов, можно реализовать процедуру поиска, позволяющую найти точку оптимума путем последовательного исключения частей исходного ограниченного интервала. Поиск завершается, когда оставшийся подинтервал уменьшается до достаточно малых размеров. Следует отметить, что правило исключения интервалов устраняет необходимость полного перебора всех допустимых точек. Несомненным достоинством поисковых методов такого рода является то, что они основаны лишь на вычислении значений функций. При этом не требуется, чтобы исследуемые функции были дифференцируемы; более того, допустимы случаи, когда функцию нельзя даже записать в аналитическом виде. Единственным требованием является возможность определения значений функции  $f(x)$  в заданных точках  $x$  с помощью прямых расчетов или имитационных экспериментов.

Вообще в процессе применения рассматриваемых методов поиска можно выделить два этапа:

- этап установления границ интервала, на котором реализуется процедура поиска достаточно широкого интервала, содержащего точку оптимума;
- этап уменьшения интервала, на котором реализуется конечная последовательность преобразований исходного интервала с тем, чтобы уменьшить его длину до заранее установленной величины.

Рассмотрим методы решения одномерных задач оптимизации вида

$$f(x) \rightarrow \max \{a \leq x \leq b\}, \quad (5)$$

где  $x$  – скаляр,  $a$  и  $b$  – соответственно концы интервала, из которого берутся значения переменной  $x$ .

Метод сканирования – заключается в последовательном переборе всех значений  $a \leq x \leq b$  с шагом  $\varepsilon$  (погрешность решения) с вычислением критерия оптимальности  $f$  в каждой точке. Путем выбора наибольшего из всех вычислений значений  $f$  и находится решение задачи  $x^*$ .

Достоинство метода в том, что можно найти глобальный максимум критерия, если  $f(x)$  – многоэкстремальная функция. К недостаткам данного метода относится значительное число повторных вычислений  $f(x)$ , что в случае сложной функции  $f(x)$  требует существенных затрат времени, однако применительно задачи исследования может быть использован, так как оптимизируемый параметр изменяется с переменным шагом.

Метод половинного деления является простейшим последовательным методом минимизации. Он позволяет для любой функции  $f(x) \in Q[a, b]$  построить последовательность вложенных отрезков  $[a, b] \supset [a_1, b_1] \supset \dots \supset [a_{n-1}, b_{n-1}] \supset [a_n, b_n]$ , каждый из которых содержит хотя бы одну из точек оптимума  $x^*$  функции  $f(x)$ .

Метод основан на делении текущего отрезка  $[a, b]$ , где содержится искомый экстремум, на две равные части с последующим выбором одной из половин, в которой локализуется максимум в качестве следующего текущего отрезка. Экстремум локализуется путем сравнения двух значений критерия оптимальности в точках, отстоящих от середины отрезка на  $\varepsilon/2$ , где  $\varepsilon$  — погрешность решения задачи оптимизации.

Если  $f(x + \varepsilon/2) > f(x - \varepsilon/2)$ , то максимум располагается на правой половине текущего отрезка  $[a, b]$ , в противном случае – на левой.

Процесс поиска завершается при достижении отрезком  $[a, b]$  величины заданной погрешности  $\varepsilon$ .

К недостаткам метода относится его работоспособность только для одноэкстремальных функций  $f(x)$  (т.е. таких, которые содержат один экстремум того типа, который ищется в задаче), так как в других случаях при сравнении двух критериев в соседних точках невозможно правильно выбрать следующий интервал, где находится максимум. Поэтому для решаемой оптимизационной задачи этот метод неприемлем.

Метод золотого сечения также является последовательным методом минимизации. Опираясь на свойства золотого сечения отрезка, этот метод использует найденные значения  $f(x)$  более рационально, чем метод деления отрезка пополам, что позволяет переходить к очередному отрезку, содержащему точку  $x^*$  после вычисления одного, а не двух значений  $f(x)$ .

Метод основан на делении текущего отрезка  $[a, b]$ , где содержится искомый экстремум, на две неравные части, подчиняющиеся правилу золотого сечения, для определения следующего отрезка, содержащего максимум.

Правило золотого сечения: отношение всего отрезка к большей его части равно отношению большей части отрезка к меньшей. Ему удовлетворяют две точки  $c$  и  $d$ , расположенные симметрично относительно середины отрезка:

$$\frac{a \cdot b}{c \cdot d} = \frac{c \cdot b}{a \cdot c}; \frac{a \cdot b}{a \cdot d} = \frac{a \cdot d}{d \cdot b}. \quad (6)$$

Путем сравнения  $f(c)$  и  $f(d)$  определяют следующий отрезок, где содержится максимум. Если  $f(d) > f(c)$ , то в качестве следующего отрезка выбирается отрезок  $[c, b]$ , в противном случае — отрезок  $[a, d]$ .

Новый отрезок снова делится на неравные части по правилу золотого сечения. Следует отметить, что точка  $d$  является и точкой золотого сечения отрезка  $[c, b]$ , т.е.

$$\frac{d \cdot b}{c \cdot d} = \frac{c \cdot d}{c \cdot b}. \quad (7)$$

Поэтому на каждой следующей итерации (кроме "запуска" метода на исходном отрезке) нужно вычислять только одно значение критерия оптимальности.

Метод золотого сечения обеспечивает более быструю сходимость к решению, чем многие другие методы, и применим, очевидно, только для одноэкстремальных функций, т.е. функций, содержащих один экстремум того типа, который ищется в задаче. Однако применительно задачи исследования метод не может быть использован, так как оптимизируемый параметр изменяется с переменным шагом.

**Выводы.** Выше были рассмотрены различные методы исключения интервалов. Еще раз подчеркнем, что эти методы пригодны для любых непрерывных одноэкстремальных функций (для метода половинного деления необходимо, чтобы функция не имела горизонтальных участков). Сходимость методов и их эффективность не зависят от свойств функции. Основное достоинство метода сканирования заключается в снижении количества повторов вычисления для решения с заданной погрешностью. Все три метода легко поддаются алгоритмизации. Для повышения точности нахождения решения необходимо просто уменьшить задаваемую погрешность. При сравнительном анализе можно сделать вывод, что метод золотого сечения оказывается более эффективным по сравнению с остальными двумя методами, поскольку он требует наименьшего числа оцениваний значения функции для достижения одной и той же заданной точности.

Проведенный анализ методов одномерной оптимизации с учетом особенностей поставленной оптимизационной задачи позволяет сделать вывод, что наиболее предпочтительным является метод сканирования, так как изменение оптимизируемого параметра  $P_2$  происходит с переменным шагом, что в полной мере сочетается с требованиями, предъявляемыми к этому параметру при создании математической модели.

#### Перечень ссылок

1. Бобров А.В. Повышение энергоэффективности поршневых компрессоров. Технічна електродинаміка.- №3.-2004.-с.70-71.
2. Бобров А.В. Нагрузка пневматической сети и её влияние на уровни потерь мощности в элементах электротехнического комплекса поршневой компрессорной установки. Вісник приазовського технічного університету. м. Маріуполь. 2008 р. Енергетика, частина друга, 68-71 с.
3. Дегтярева В.В. Нормирование топливно-энергетических ресурсов и регулирование режимов электропотребления: Сборник инструкций/ Под общ. ред. В.В.Дегтярева.-М.:Недра,1983.- 223 с.
4. Назаренко У.П. Экономия электроэнергии при производстве и использовании сжатого воздуха / У.П. Назаренко.- М.:Энергия,1976.- 103 с.
5. Сухарев А.Г. Курс методов оптимизации: Учеб. Пособие / А.Г.Сухарев, А.В.Тимохов, В.В.Федоров // 2-е изд. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. — 368 с.
6. Пантелеев, А.В. Методы оптимизации в примерах и задачах: Учеб. пособие/А.В. Пантелеев, Т.А. Летова. — 2-е изд., исправл. — М.: Высш. шк., 2005. — 544 с.
7. Пантелеев А.В. Методы оптимизации в примерах и задачах: Учеб. пособие / А.В. Пантелеев, Т.А. Летова. — 2-е изд., исправл. — М.: Высш. шк., 2005. — 544 с.
8. Сухарев А.Г. Курс методов оптимизации: Учеб. Пособие / А.Г. Сухарев, А.В. Тимохов, В.В. Федоров 2-е изд. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. — 368 с.

*Рекомендовано до друку: д-ром техн. наук, проф. Випанасенко С.І.*