

УДК 621.31; 681.3

АЛГОРИТМЫ ОПТИМИЗАЦИИ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ МАГИСТРАЛЬНЫХ НАСОСОВ МЕТОДОМ ПОКООРИНАТНОГО СПУСКА^{1*}

Шабанов В.А. ^{*1}, Павлова З.Х. ^{*2}

Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа
*e-mail: ^{*1} ShabanovVA1@yandex.ru, ^{*2} zpavlova@mail.ru*

Аннотация. *Рассматривается применение метода покоординатного спуска для оптимизации частотно-регулируемых электроприводов магистральных насосов нефтеперекачивающих станций. Показано, что в классическом виде метод покоординатного спуска неприменим из-за отсутствия независимости переменных. Предложены возможные стратегии реализации алгоритма покоординатного спуска, приведена последовательность выполнения расчетов.*

Ключевые слова: *частотно-регулируемый электропривод, магистральный насос, нефтеперекачивающая станция, оптимизация, метод покоординатного спуска*

При разработке частотно-регулируемых электроприводов (ЧРЭП) для магистральных насосов (МН) нефтеперекачивающих станций (НПС) одной из наиболее важных задач является определение оптимальных скоростей вращения МН. Такая задача решается путем минимизации целевой функции, в качестве которой принимают: сумму мощностей, потребляемых всеми насосами технологического участка; удельный расход электроэнергии или эквивалентный коэффициент полезного действия [1, 2]. Существует большое разнообразие алгоритмов оптимизации [3, 4]. Для правильного выбора метода оптимизации необходимо знать свойства целевой функции и ее поведение в пространстве оптимизируемых переменных. Число переменных при оптимизации определяется числом регулируемых насосов на технологическом участке и может достигать 15-20 и более. Для изучения свойств целевой функции широко используется метод покоординатного спуска. В статье рассматриваются особенности использования метода покоординатного спуска для оптимизации ЧРЭП МН на НПС.

Метод покоординатного спуска, относится к методам безусловной оптимизации, идея которого состоит в том, чтобы свести оптимизацию в многомерном пространстве к многократно повторяемой одномерной оптимизации. Геометрический смысл метода состоит в последовательном движении в направлениях, параллельных координатным осям. При движении вдоль координатной оси варьирование исследуемой переменной производится до точки минимума целевой функции. Траектория изменения целевой функции вдоль исследуемой координаты отражает

¹ При подготовке статьи использованы результаты исследований, выполненных при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ по комплексному проекту «Разработка и организация серийного производства мощных высоковольтных частотно-регулируемых приводов (ВЧРП)» (договор №13.G25.31.0060).

свойства целевой функции. Рассмотрим применение метода покоординатного спуска на примере оптимизации ЧРЭП МН технологического участка из четырех НПС, схема которого, приведена на рис. 1.

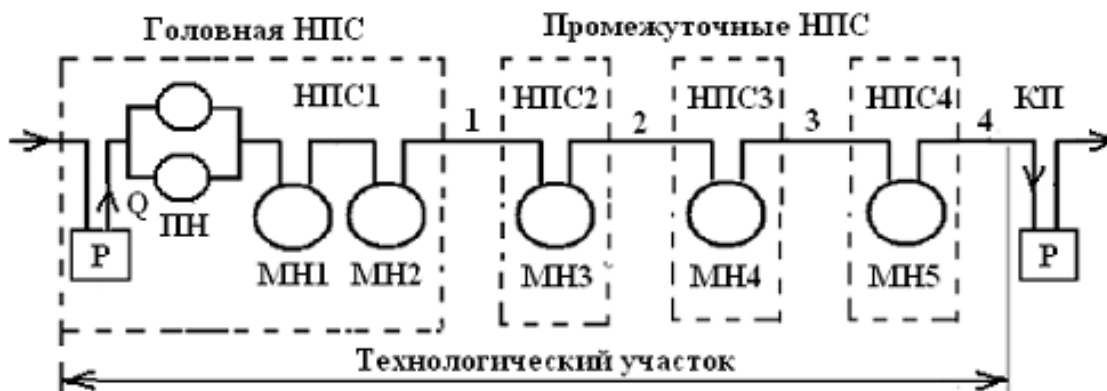


Рис. 1. Схема технологического участка

При самой большой нагрузке трубопровода на каждой НПС в работе может быть до трех МН. Из них, в общем случае, все МН могут быть регулируемыми. Предположим, что процесс перекачки осуществляется пятью МН (МН1, МН2, МН3, МН4, МН5). На НПС1 в работе два МН, на остальных НПС – по одному рабочему МН. Обозначим скорости вращения регулируемых МН через n_1, n_2, n_3, n_4, n_5 . Нумерация насосов по порядку, начиная от головной станции по ходу потока жидкости в трубопроводе. Подпор на входе МН1 НПС1 создается двумя подпорными насосами ПН, включенными параллельно.

Особенности метода покоординатного спуска при оптимизации ЧРЭП МН

Процедура оптимизации методом покоординатного спуска предполагает поочередное изменение каждой из управляемых переменных при постоянных значениях других переменных [4]. При этом траектория движения в пространстве управляемых переменных содержит отрезки прямых, параллельных одной из координат. Однако применительно к оптимизации ЧРЭП изменять одну из переменных независимо от других нельзя, так как скорости вращения разных МН одного технологического участка связаны уравнением баланса напоров

$$\sum_1^l (a_{pi} \cdot v_i^2) - \left(\sum_1^k b_{pi} \right) \cdot Q^{2-m} + A_k - B_k Q^{2-m} = 0, \quad (1)$$

где a_{pi} и b_{pi} – коэффициенты напорной характеристики регулируемых насосов; A_k и B_k – коэффициенты уравнения баланса напоров при всех k отключенных регулируемых МН:

$$A_k = a_{II} + \sum_{i=1}^{n-k} a_i - \Delta z - h_{ocm}; \quad (2)$$

$$B_k = 1,02 fL \cdot \frac{1}{3600^{2-m}} + \left[\frac{b_n}{m_n^{2-m}} \right] + \sum_{i=1}^{n-k} b_i, \quad (3)$$

где a_n, b_n, a_i, b_i – коэффициенты напорных характеристик подпорного и магистрального насосов; n – число работающих магистральных насосов; m_n – число работающих подпорных насосов; Δz – разность геодезических отметок по концам технологического участка; $h_{ост}$ – остаточный напор в конце технологического участка [5].

Поэтому при покоординатном спуске при оптимизации ЧРЭП НПС необходимо одновременно изменять две управляемые переменные. Одна из переменных – это варьируемая скорость вращения v_{var} исследуемого насоса, по которой выполняется покоординатный спуск, и оптимальное значение которой определяется. Вторая переменная – это скорость еще одного из регулируемых насосов v_j , которая рассчитывается по выражению

$$v_j = \sqrt{\frac{(\sum_1^k b_{pi} + B_k) \cdot Q^{2-m} - \sum_1^{n-k} a_i - \sum_1^{k-2} (a_{pi} \cdot v_i^2) - A_k - a \cdot v_{var}}{a_{p2}}}. \quad (4)$$

При этом определяется оптимальное сочетание скоростей вращения двух МН при фиксированных скоростях вращения других МН. По сути, производится спуск не по одной, а одновременно по двум координатам. Причем только одна из координат v_{var} является управляемой (независимой), а вторая v_j – является зависимой и рассчитывается по выражению (4).

В зависимости от того, как выбираются управляемая и зависимая координаты, возможно несколько стратегий оптимизации ЧРЭП МН.

Стратегия 1. Если независимой координатой является скорость вращения i -го насоса, то в качестве зависимой координаты принимается скорость вращения $(i+1)$ -го насоса, следующего по ходу потока жидкости в трубопроводе за исследуемым МН.

Цикл 1. Процедура покоординатного спуска при оптимизации ЧРЭП МН по стратегии 1 выполняется следующим образом. Сначала выполняется спуск по управляемой координате n_1 первого насоса и на каждом шаге варьирования определяется скорость вращения второго насоса n_2 . Шаг варьирования переменной n_1 может быть принят равным 30 об/мин. или в относительных единицах $\Delta v = 0,01$. На каждом шаге определяются напоры всех насосов, КПД насосов и электродвигателей, мощности, потребляемые из сети каждым из электродвигателей, и значение целевой функции F . Спуск по координатам n_1, n_2 продолжается до достижения минимума целевой функции или до нарушения одного из ограничений.

Затем фиксируется значение переменной n_1 и выполняется спуск по координатам n_2 и n_3 , где n_2 является независимой переменной, а значение n_3 рассчитывается и по выражению (4). Движение вдоль координат n_2, n_3 также идет до дости-

жения минимума целевой функции. И далее аналогично производится спуск по координатам n_3 и n_4 ; n_4 и n_5 ; n_5 и n_1 . После спуска по координате последнего насоса, в данном случае МН5, и достижения минимума фиксируются значения всех управляемых переменных (скоростей вращения всех МН) и минимальное значение целевой функции $F_{1ц}$ первого цикла.

Аналогично выполняется цикл 2. В цикле 2 повторяются спуски по координатам $n_1 - n_5$, но уже при значениях управляемых переменных (скоростей вращения), которые они получили в конце первого цикла. После завершения второго цикла фиксируется значение целевой функции $F_{2ц}$, которое сравнивается со значением целевой функции после первого цикла и проверяется условие окончания счета. Затем при необходимости выполняется циклы 3, 4 и т.д. После каждого цикла проверяется условие окончания счета. При выполнении условия окончания счета процесс оптимизации завершается.

Стратегия 2. Суть ее в том, что при любой независимой (исследуемой) координате в качестве зависимой координаты принимается скорость вращения последнего МН технологического участка.

Цикл 1. При спуске по координате n_1 по выражению (4) рассчитывается скорость вращения n_5 последнего насоса по ходу потока (насоса МН5 на рис. 1). Затем производится переход к спуску по координате n_2 . При спуске по координате n_2 также рассчитывается скорость вращения n_5 последнего насоса по ходу потока. И далее аналогично производится спуск по координатам n_3 и 4. После спуска по координате предпоследнего насоса, в данном случае МН4, фиксируется первое значение целевой функции.

В цикле 2 повторяется цикл 1, но уже при значениях управляемых переменных (скоростей вращения), которые они получили в конце первого цикла и т.д. После каждого цикла проверяется условие окончания счета. При выполнении условия окончания счета процесс оптимизации завершается.

Достоинство стратегии 2: процедуры спуска в цикле 1 по каждой координате аналогичны и легче поддаются математическому описанию.

Стратегия 3. Особенность ее в объединении двух регулируемых переменных в одну координату и раздельном поиске минимума для каждой пары управляемых переменных. Предположим сначала, что МН1 нерегулируемый и число ЧРЭП четное (четыре на рис. 1)

Цикл 1. Производится спуск по координатам двух первых регулируемых насосов МН2 и МН3 при постоянном значении скоростей вращения всех других МН. При этом скорость вращения одного из насосов варьируется с шагом 30 об/мин., а скорость другого МН определяется по выражению (4). При достижении минимума целевой фиксируются значения координат n_2 и n_3 . Затем производится спуск по двум координатам насосов МН4 и МН5, не участвующих в первом спуске. При четном числе регулируемых насосов первый цикл на этом заканчивается.

Цикл 2. Повторяется цикл 1, но уже при значениях управляемых переменных, зафиксированных в конце первого цикла.

При нечетном числе регулируемых МН (например, пять) происходит смена сочетания исследуемых переменных, при этом спуск последовательно производится по координатам n_1 и n_2 ; n_3 и n_4 ; n_4 и n_5 ; n_5 и n_1 , n_2 и n_2 и т.д. до достижения минимума целевой функции.

Последовательность расчетов при использовании оптимизационных процедур

Постановка задачи. Предположим, что на каждой НПС только по одному ЧРЭП. Тогда из пяти МН технологического участка на рис. 1 регулируемыми являются насосы МН2, МН3, МН4 и МН5. Насос МН1 не регулируемый. Требуется выбрать оптимальные скорости вращения всех регулируемых МН технологического участка для обеспечения требуемой производительности перекачки так, чтобы потребление мощности из электрической сети было минимальным.

1. Формируется база исходных данных: требуемая производительность перекачки; параметры трубопровода; коэффициенты a и b напорных характеристик подпорных насосов и МН; высотные отметки начальной и конечной точек трубопровода, высотные отметки всех НПС и всех перевальных точек; коэффициенты для вычисления КПД МН.

2. Определяются числа Рейнольдса, режим течения и его параметры (m и β [5]). Определяется гидравлический уклон при единичном расходе.

3. Для каждой НПС задаются разрешенные значения напоров на выходе и подпоры на входе; задаются возможные перевальные точки (расстояние до них и высотные отметки) на трассе нефтепровода. Разрешенные значения напоров и подпоры вносятся в базу данных по ограничениям. Определяются минимально допустимые скорости вращения каждого из регулируемых насосов [6, 7]. Найденные значения минимально-допустимой скорости вращения вносятся в базу данных по ограничениям.

4. Все регулируемые МН нумеруются, начиная с головной НПС, и разбиваются на пары. Задаются координаты исходного режима (скорости вращения всех МН технологического участка). Задается шаг варьирования Δv управляемой координаты.

5. Выполняются расчеты по одной из стратегий оптимизации. На каждом шаге определяются подпоры на входе и напоры на выходе каждого из МН технологического участка, строится линии гидравлического уклона, определяются напоры в перевальных точках и проверяются граничные условия. Значение скорости вращения МН, при которой происходит нарушение одного из граничных условий, будет соответствовать минимально допустимой частоте вращения регулируемого насоса. Определяется КПД регулируемых и не регулируемых насосов. Проверяется

граничное условие по величине допустимого КПД. Определяется значение целевой функции и проверяется условие окончания счета. Если условие окончания счета не выполняется, то значение управляемой переменной изменяется на величину шага варьирования: и расчеты повторяются. Поочередные спуски по каждой паре координат, выбираемых в соответствии с принятой стратегией, продолжаются до выполнения условия окончания счета (процесса оптимизации).

Выводы

1. Показаны особенности метода покоординатного спуска при использовании его для оптимизации ЧРЭП МН на нефтеперекачивающих станциях. Разработаны стратегии поиска оптимального решения в зависимости от сочетания зависимой и независимой координат.

2. Приведена последовательность расчетов при использовании оптимизационных процедур покоординатного спуска.

Литература

1. Туманский А.П. Оптимизация режимов перекачки по магистральным трубопроводам с перекачивающими станциями, оборудованными частотно-регулируемым приводом // Транспорт и хранение нефтепродуктов. 2005. № 8. С. 11 - 14.

2. Шабанов В.А., Кабаргина О.В., Павлова З.Х. Оценка эффективности частотного регулирования магистральных насосов по эквивалентному коэффициенту полезного действия // Электронный научный журнал "Нефтегазовое дело". 2011. № 6. С. 24 - 29. URL: http://www.ogbus.ru/authors/Shabanov/Shabanov_8.pdf

3. Реклейтис Г., Рейвиндран А., Рэгсдел К. Оптимизация в технике. В 2-х кн. Книга 2. Пер. с англ. М.: Мир, 1986. 320 с.

4. Струченков В.И. Методы оптимизации в прикладных задачах. М.: Солон-Пресс, 2009. 320 с.

5. Нечваль А.М. Основные задачи при проектировании и эксплуатации магистральных нефтепроводов: учебное пособие. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2005. 81 с.

6. Шабанов В.А., Кабаргина О.В. Диапазон частотного регулирования электродвигателей магистральных насосов // Achievement of high school: материалы 7-ой международ. науч.-практ. конф. София. «Бял ГРАД-БГ» ООД, 2011. Т. 30. Технологии. С. 53-57.

7. Шабанов В.А., Кабаргина О.В. Определение нижней границы диапазона частотного регулирования электродвигателей магистральных насосов // Электронный научный журнал "Нефтегазовое дело", 2010. № 2. 8 с. URL: http://www.ogbus.ru/authors/Shabanov/Shabanov_3.pdf

ALGORITHMS OF OPTIMIZATION OF FREQUENCY-ADJUSTABLE ELECTRIC DRIVES OF THE MAIN PUMPS BY COORDINATE DESCENT METHOD

V.A. Shabanov¹, Z.Kh. Pavlova²

Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

e-mail: ¹ShabanovVA1@yandex.ru, ²zpavlova@mail.ru

Abstract. In article are considered the application of coordinate descent method for optimization of frequency-adjustable electric drives of the main pumps at oil pumping stations. It is shown that in a classical look the coordinate descent method is inapplicable in the absence of independence of variables. Possible strategy of realization of coordinate descent method are offered, the calculations sequence is given.

Keywords: frequency-adjustable electric drive, main pump, oil pumping station, optimization, coordinate descent method

References

1. Tumanskii A.P. Optimizatsiya rezhimov perekachki po magistral'nym truboprovodam s perekachivayushchimi stantsiyami, oborudovannymi chastotno-reguliruemym privodom (Optimization of pumping through pipelines with pumping stations equipped with variable frequency drive), *Transport i khranenie nefteproduktov*, 2005, Issue 8, pp. 11-14.
2. V.A. Shabanov, O.V. Kabargina, Z.Kh. Pavlova. Evaluating the effectiveness of adjustable-frequency electric drives of main pumps (Otsenka effektivnosti chastotnogo regulirovaniya magistral'nykh nasosov po ekvivalentnomu koeffitsientu poleznogo deistviya). *Electronic scientific journal "Neftegazovoe delo - Oil and Gas Business"*, 2011, Issue 6, pp. 24-29. http://www.ogbus.ru/authors/Shabanov/Shabanov_8.pdf
3. Rekleitis G., Reivindran A., Regsdel K. Optimizatsiya v tekhnike. In two books. Book 2. Moscow, Mir, 1986. 320 p. (Transl from: G.V. Reklaitis, A. Ravindrak, M. Ragsdell. *Engineering Optimization: Methods and Applications*. John Wiley & Sons, 1983).
4. Struchenkov V.I. *Metody optimizatsii v prikladnykh zadachakh* (Optimization methods in applied problems). Moscow, Solon-Press, 2009. 320 p.
5. Nechval' A.M. *Osnovnye zadachi pri proektirovanii i ekspluatatsii magistral'nykh nefteprovodov. Uchebnoe posobie* (The main problems of the design and operation of main oil pipelines. Study guide). Ufa, UGNTU, 2005. 81 p.
6. Shabanov V.A., Kabargina O.V. Diapazon chastotnogo regulirovaniya elektrodvigateli magistral'nykh nasosov (The frequency regulation range of electric motors of main pumps) in *Proceedings of 7th International. sci.-pract. conf. "Achievement of high school"*. Sofia, 2011. Volume 30. Technologies, pp. 53-57.

7. Shabanov V.A., Kabargina O.V. Opredelenie nizhnei granitsy diapazona chastotnogo regulirovaniya elektrodvigatelyi magistral'nykh nasosov (Determine the lower range limits of frequency regulation electric drive main pump), *Electronic scientific journal "Neftegazovoe delo - Oil and Gas Business"*, 2010, Issue 2, 8 p.
http://www.ogbus.ru/authors/Shabanov/Shabanov_3.pdf