

УДК 622.692.4, 621.31

**АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ
МАГИСТРАЛЬНЫХ НАСОСОВ**

**ALGORITHM TO DETERMINE THE ROTATIONAL SPEED
OF THE MAIN PUMPS**

Шабанов В.А., Шарипова С.Ф.

ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный нефтяной технический университет»,
г. Уфа, Российская Федерация

V.A. Shabanov, S.F. Sharipova

FSBEI NPE “Ufa state petroleum technological university”, Ufa, Russian Federation

e-mail: SharipovaSveta@yandex.ru

Аннотация. В статье рассмотрены недостатки регулирования режимов перекачки нефти по магистральным нефтепроводам переключением числа магистральных насосов. Приведено обоснование использования частотно-регулируемого электропривода для регулирования производительности трубопровода.

Для заданного технологического участка нефтепровода записано уравнение баланса напоров при частотном регулировании магистральных насосов, учитывающее регулируемые насосы.

В статье рассматривается определение частоты вращения магистральных насосов с учетом режимов работы и частот вращения других насосов технологического участка. Получены обобщенные выражения для определения частоты вращения регулируемых насосов, справедливые при любом числе регулируемых насосов на НПС технологического участка. Предложен алгоритм расчета при одинаковых частотах вращения магистральных насосов. Приведена структурная схема реализации алгоритма.

Abstract. The article considers the problems of regulation modes of pumping oil through main pipelines switching the number of the pumps. Explain the rationale for the use of variable frequency drives to regulate the performance of the pipeline.

Specified technological section of the pipeline recorded balance equation pressures for frequency regulation main pumps, taking into account regulated pumps.

In the article speed of the main pumps with the modes and speeds of other pumps of technological area are discussed. The generalized expressions for the speed pumps that are valid for any number of variable pumps at pumping stations are

investigated. The algorithm of calculation speeds of main pumps, when all of them have the same speed of rotation is given. The block diagram of the algorithm is shown.

Ключевые слова: частотно-регулируемый электропривод, магистральный насос, нефтепровод, частота вращения, производительность нефтепровода, напор центробежного насоса, алгоритм.

Keywords: frequency-regulated electric drive, main pump, a pipeline, a rotational speed, the performance of the pipeline, centrifugal pump head, algorithm.

В настоящее время изменение производительности перекачки нефти по магистральным нефтепроводам производится переключением числа магистральных насосов [1, 2]. Такое регулирование режимов перекачки имеет несколько недостатков. Во-первых, такое регулирование является ступенчатым. Во-вторых, магистральные насосы в условиях недогрузки трубопроводов работают не в оптимальном режиме, и их коэффициент полезного действия может существенно отличаться от номинального [3, 4]. В-третьих, отключение и включение насосов приводит к возникновению в нефтепроводе волн повышенного давления [5, 6]. Резкие повышения давления в нефтепроводе при образовании волн давления и возникающие при этом механические напряжения в стенке трубы могут привести к разрывам нефтепровода, повреждению трубопроводной арматуры и нарушению работы всей системы с тяжелыми экологическими последствиями [7, 8].

При использовании частотно-регулируемого электропривода (ЧРЭП) регулирование производительности трубопровода осуществляются изменением частоты вращения электродвигателей и приводимых ими во вращение магистральных насосов без многочисленных включений и отключений. При этом за счет изменения частоты вращения сохраняются высокие значения коэффициентов полезного действия и электродвигателей, и приводимых ими в действие рабочих механизмов [9]. За счет плавного изменения частоты вращения снижаются волны давления в нефтепроводе, вследствие чего повышается надежность трубопровода и трубопроводной арматуры и решается задача повышения экологической безопасности [10].

Технологический участок магистрального нефтепровода содержит несколько нефтеперекачивающих станций (НПС). При системе перекачки «из насоса в насос» режимы работы насосов всех НПС оказываются взаимосвязанными. При этом одной из проблем, которую необходимо решить при создании ЧРЭП, является разработка алгоритма определения частоты вращения магистральных насосов с учетом режимов работы всех насосов технологического участка.

Рассмотрим технологический участок нефтепровода, на головной станции которого в работе $m_{\text{п}}$ подпорных насосов, а в режиме перекачки участвуют n – магистральных насосов. При отсутствии частотного регулирования

магистральных насосов уравнение баланса напоров для такого технологического участка имеет вид [2]:

$$\left[a_{\Pi} - b_{\Pi} \left(\frac{Q}{m_{\Pi}} \right)^{2-m} \right] + \sum_{i=1}^n (a_i - b_i Q^{2-m}) = 1,02 \cdot f \cdot L \cdot Q^{2-m} + \Delta z + h_{\text{ост}}, \quad (1)$$

где a_{Π} , b_{Π} , a_i , b_i – коэффициенты аппроксимации напорных характеристик подпорного и магистрального насосов, $[a] = \text{м}$; $[b] = \text{м}/(\text{м}^3/\text{ч})^2$;

Q – производительность, $\text{м}^3/\text{ч}$;

m – коэффициент режима, определяемый в зависимости от режима течения жидкости;

f – гидравлический уклон при единичном расходе, $1/(\text{м}^3/\text{ч})^2$;

L – длина технологического участка нефтепровода, м ;

Δz – разность геодезических отметок, м ;

$h_{\text{ост}}$ – остаточный напор в конце технологического участка, м .

При n включенных насосах, из которых k – регулируемые, уравнение (1) можно записать в виде:

$$a_{\Pi} - b_{\Pi} \left(\frac{Q}{n_{\Pi}} \right)^{2-m} + \sum_{i=1}^{n-k} (a_i - b_i Q^{2-m}) + \sum_{i=1}^k (a_i \cdot v^2 - b_i Q^{2-m}) = 1,02 f L Q^{2-m} + \Delta z + h_{\text{ост}}, \quad (2)$$

где $v = \omega/\omega_{\text{ном}}$ – относительная частота вращения насоса; ω и $\omega_{\text{ном}}$ – текущая и номинальная угловая частота вращения насоса.

Обозначим:

$$A_{n,k} = a_{\Pi} + \sum_{i=1}^{n-k} a_i - \Delta z - h_{\text{ост}}; \quad (3)$$

$$B_{n,k} = 1,02 f L + \left[\frac{b_{\Pi}}{m_{\Pi}^{2-m}} \right] + \sum_{i=1}^{n-k} b_i. \quad (4)$$

Тогда уравнение (2) принимает вид:

$$A_{n,k} - B_{n,k} \cdot Q^{2-m} + \sum_{i=1}^k (a_i \cdot v^2 - b_i Q^{2-m}) = 0, \quad (5)$$

Из выражений (3) и (4) видно, что коэффициенты $B_{n,k}$ и $A_{n,k}$ вычисляются по параметрам трубопровода и $n-k$ нерегулируемых насосов. Из (5) производительность нефтепровода будет:

$$Q_{n,k} = \left(\frac{A_{n,k} + \sum_{i=1}^k (a_i \cdot v^2)}{B_{n,k} + \sum_{i=1}^k b_i} \right)^{\frac{1}{2-m}} . \quad (6)$$

В уравнении баланса напоров (2) принято, что напорная характеристика центробежного насоса при регулируемой частоте вращения может быть представлена в виде:

$$H = a_p \cdot v^2 - b_p Q^{2-m} , \quad (7)$$

где a_p и b_p – коэффициенты аппроксимации напорной характеристики регулируемого насоса.

При снижении частоты вращения одного из регулируемых насосов технологического участка снижается производительность нефтепровода по выражению (6) и снижается развиваемый им напор в соответствии с выражением (7). При частоте вращения v_{\min} напор снижается до нуля, и насос перестает участвовать в режиме перекачки. При этом в перекачке будут участвовать $n-1$ насосов, из которых $k-1$ регулируемые, и в соответствии с (6) производительность нефтепровода при этом будет:

$$Q_{n-1,k-1} = \left(\frac{A_{n-1,k-1} + \sum_{i=1}^{k-1} (a_i \cdot v^2)}{B_{n-1,k-1} + \sum_{i=1}^{k-1} b_i} \right)^{\frac{1}{2-m}} . \quad (8)$$

Для определения частоты вращения, при которой насос «выключается» из режима перекачки, достаточно найти производительность нефтепровода по (8), подставить ее в (7) и приравнять правую часть выражения (7) нулю. При этом минимально допустимая частота вращения насоса в рабочем диапазоне производительностей нефтепровода равна:

$$v_{\min} = \sqrt{\frac{b_p \cdot Q_{n-1,k-1}^{2-m}}{a_p}} . \quad (9)$$

Частота вращения v_{\min} является нижней границей рабочего диапазона регулирования. Следовательно, плавность регулирования частоты вращения насоса надо обеспечивать в диапазоне от $v=1,0$ до v_{\min} .

В случае последовательного соединения одноступенчатых магистральных насосов минимум затрат энергии на перекачку будет при одинаковых частотах

вращения регулируемых магистральных насосов на всех насосных станциях [11]. Если на НПС технологического участка установлены однотипные насосы, то из выражения (5), принимая частоты вращения всех k регулируемых насосов одинаковыми, получим:

$$v_k = \sqrt{\frac{(k \cdot b_p + B_{n,k}) \cdot Q_{пл}^{2-m} - A_{n,k}}{k \cdot a_p}}, \quad (10)$$

где $Q_{пл}$ – плановая (требуемая) производительность трубопровода.

В общем случае, частоты вращения насосов могут быть разными, и частота вращения каждого из них зависит от частоты вращения других насосов. Из выражения (5) при известных частотах вращения $k-1$ регулируемых насосов можно получить выражение для частоты вращения j -го насоса в виде:

$$v_j = \sqrt{\frac{B_{n,j} \cdot Q_{пл}^{2-m} - A_{n,k}}{\sum_{i=1, i \neq j}^{k-1} (a_i \cdot v_i^2)}}. \quad (11)$$

Если частоты вращения всех $k-1$ насосов одинаковые, выражение (11) принимает вид:

$$v_j = \sqrt{\frac{B_{n,j} \cdot Q_{пл}^{2-m} - A_{n,k}}{(k-1) \cdot a_i \cdot v_i^2}}. \quad (12)$$

Выражения (2) – (12) позволяют организовать алгоритм определения частоты вращения магистральных насосов при переходе от одного режима перекачки к другому. В исходных данных должны быть заданы: число НПС «с», число включенных насосов «п», их технические параметры и расположение по НПС, сжатый профиль трассы, плановая производительность $Q_{пл}$, число насосов «к», оборудованных ЧРЭП, и их расположение по НПС технологического участка. Требуется определить требуемое число регулируемых насосов и частоты их вращения. Алгоритм при этом может быть следующий (рисунок 1).



Рисунок 1. Структурная схема алгоритма управления ЦРЭП

Алгоритм работает в следующей последовательности.

1. Сначала проверяется, можно ли получить требуемую производительность нефтепровода при одном регулируемом насосе.

Для этого по формуле (10) при $k=1$ определяется требуемая частота вращения $v_{тр}$; по формуле (9) при $k=1$ определяется минимально допустимая частота вращения $v_{мин}$. и проверяется неравенство:

$$V_{тр} \geq V_{мин}. \quad (13)$$

Если неравенство (13) выполняется, то выбирается НПС, на которой следует регулировать частоту вращения насосного агрегата [12].

2. Принимается два регулируемых насосных агрегата. Проверяется, можно ли их частоты вращения принять одинаковыми. Для этого по формуле (10) при $k=2$ определяется их требуемая частота вращения $v_{тр}$; по формуле (9) при $k=2$ определяется минимально допустимая частота вращения $v_{мин}$. и проверяется неравенство (13).

3. Аналогичные расчеты повторяются для числа регулируемых насосов 3, 4, ..., k .

4. Для всех вариантов, в которых выполняется неравенство (13), выполняется выбор НПС и насосов, частоту вращения которых следует регулировать.

5. Выполняется гидравлический расчет: определяется производительность нефтепровода (при правильно выбраны частотах вращения она должна быть равна плановой $Q_{пл}$), напоры на входах и выходах всех НПС и в перевальных точках. Проверяются ограничения по напорам и подпорам. Отбрасываются все варианты, в которых ограничения не выполняются.

6. Производится сравнение вариантов по одному из критериев эффективности использования ЧРЭП, например, по минимальному расходу электроэнергии. Выбирается вариант с оптимальным критерием эффективности.

Если во всех вариантах происходит нарушение одного или нескольких ограничений, то принимать одинаковые частоты вращения всех регулируемых насосов нельзя. В этом случае используются оптимизационные алгоритмы с расчетом частот вращения по выражениям (11) и (12).

Выводы

1. Получены обобщенные выражения для частоты вращения регулируемых насосов, справедливые при любом числе регулируемых насосов на НПС технологического участка.

2. Предложен алгоритм определения частоты вращения магистральных насосов. Приведена структурная схема реализации алгоритма.

При подготовке статьи использованы результаты исследований, выполненных при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ по программе «Разработка и организация серийного производства мощных высоковольтных частотно-регулируемых приводов (ВЧРП)» (шифр 2010-218-02-051, договор №13.G25.31.0060)

Литература

1. Коршак А.А., Нечваль А.М. Трубопроводный транспорт нефти, нефтепродуктов и газа: учеб. для вузов. Уфа: ООО «ДизайнПолиграфСервис», 2001. 571 с.
2. Нечваль А.М. Основные задачи при проектировании и эксплуатации магистральных нефтепроводов: учеб. пособие. Уфа: изд-во УГНТУ, 2005. 81 с.
3. Шабанов В.А., Ахметгареев А.А. К вопросу о выборе оптимального режима работы магистрального насоса с частотно-регулируемым приводом // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2012. №3(89). С. 119-127.
4. Туманский А.П. Оптимизация режимов перекачки по магистральным нефтепроводам с нефтеперекачивающими станциями, оборудованными частотно-регулируемыми приводами // Транспорт и хранение нефтепродуктов. 2005. №8. С. 11-14.
5. Шабанов В.А., Кабаргина О.В. Анализ волн давления при частотно регулируемом электроприводе магистральных насосов на НПС // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2011. №3 (85). С. 111-118.
6. Шабанов В.А., Кабаргина О.В., Павлова З.Х. Требования к ступени снижения частоты при частотном регулировании электроприводов магистральных насосов // Нефтегазовое дело: электрон. науч. журн. 2011. №4. С. 14-19. URL: http://www.ogbus.ru/authors/Shabanov/Shabanov_6.pdf (дата обращения: 05.06.2013).
7. Баширов И.В. Разрушение технологических трубопроводов при одновременном воздействии циклических и вибрационных нагрузок, на резонансной частоте // Нефтегазовое дело: электрон. науч. журн. 2012. №4. С. 370-377. URL: http://www.ogbus.ru/authors/BashirovIV/BashirovIV_1.pdf (дата обращения: 05.06.2013).
8. Прочность труб магистральных нефте- и продуктопроводов при статическом и малоцикловом нагружении / Волский М.И. и др. // Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов: обзор. информ. М.: ВНИИОЭНГ, 1979. 55 с. – (Нефтяная промышленность).
9. Шабанов В.А., Кабаргина О.В., Павлова З.Х. Оценка эффективности частотного регулирования магистральных насосов по эквивалентному коэффициенту полезного действия // Нефтегазовое дело: электрон. науч. журн.

2011. №6. С. 24-29. URL: http://www.ogbus.ru/authors/Shabanov/Shabanov_8.pdf (дата обращения: 06.06.2013).

10. Сокол Е.И., Бару А.Ю., Лукпанов Ж.К. Опыт разработки и внедрения преобразователей частоты для регулируемого электропривода насосных агрегатов МН // Электротехника. 2004. №7. С.52-57.

11. Гольянов А.И., Михайлов Д.А. О распределении напоров насосных перекачивающих станций, оборудованных насосными агрегатами с частотно-регулируемым приводом // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2011. №1. С. 6-9.

12. Шабанов В.А. Основы методики выбора числа и места установки частотно-регулируемых электроприводов магистральных насосов // Нефтегазовое дело. 2012. Т.10, №2. С. 36-39.

References

1. Korshak A.A., Nechval' A.M. Truboprovodnii transport nefiti, nefteproductov i gaza: Uchebnik dlya vuzov. Ufa: ООО "DizainPoligrafServis", 2001. 571 s. [in russian].

2. Nechval' A.M. Osnovnii zadachi pri proektirovanii i eksplyatacii magistral'nyh nefteprovodov. Uchebnoe posobie. Ufa: Izdatel'stvo UGNTU, 2005. 81 s. [in russian].

3. Shabanov V.A., Ahmetgareev A.A. K voprosu o vybore optimal'nogo rezhima raboty magistral'nogo nasosa s chastotno-reguliruемым приводом // Problemy sbora, podgotovki i transporta nefiti i nefteproductov. 2012. №3(89). С. 119-127. [in russian].

4. Tumanskii A.P. Optimizaciya rezhimov perekachki po magistral'nyh nefteprovodam s perekachivaushimi stanciyami, oborudovannymi chastotno-regyliruemyimi privodami // Transport i hranenie nefteproductov. 2005. №8. S. 11-14. [in russian].

5. Shabanov V.A., Kabargina O.V. Analiz voln davleniya pri chastotno-regyliruемом электроприводе магистрал'nyh nasosov na NPS // Problemy sbora, podgotovki i transporta nefiti i nefteproductov. 2011. №3 (85). S. 111-118. [in russian].

6. Shabanov V.A., Kabargina O.V., Pavlova Z.H. Trebovaniya k stypeni snizheniya chastoty pri chastotnom regulirovanii электроприводов магистрал'nyh nasosov // Elektronyi nauchnyi zhurnal "Neftegazovoe delo". 2011. №4. С. 14-19. URL: http://www.ogbus.ru/authors/Shabanov/Shabanov_6.pdf (data obrasheniya: 05.06.2013). [in russian].

7. Bashirov I.V. Razrushenie tehnologicheskikh tryboprovodov pri odnovremennom vozdeistvii ciklicheskih i vibracionnih nagruzok, na rezonansnoy chastote // Elektronyi nauchnyi zhurnal "Neftegazovoe delo". 2012. №4. S. 370-377. URL: http://www.ogbus.ru/authors/BashirovIV/BashirovIV_1.pdf (data obrasheniya: 05.06.2013). [in russian].

8. Volskii M.I., Aistov A.S., Gysenkov A.P. i dr. Prochnost' tryb magistral'nyh nefte- i produktoprovodov pri staticheskom i malociklovom nagruzhenii // Neftyanaya promychlennost'. Seriya Transport i hranenie nefti i nefteproduktov: Obzor. inform. M.: VNIIOENG, 1979. 55 s. [in russian].

9. Shabanov V.A., Kabargina O.V., Pavlova Z.H. Ocenka effektivnosti chastotnogo regulirovaniya magistral'nyh nasosov po ekvivalentnomu koefficientu poleznogo deistviya // Elektronnyi nauchnyi zhurnal "Neftegazovoe delo". 2011. №6. S. 24-29. URL: http://www.ogbus.ru/authors/Shabanov/Shabanov_8.pdf (data obrasheniya: 06.06.2013). [in russian].

10. Sokol E.I., Bary A.U., Lykpanov Zh.K. Opyt razrabotki i vnedreniya preobrazovatelei chastoty dlya reguliruyemogo elektroprivoda nasosnyh agregatov MN // Elektrotehnika. 2004. №7. S.52-57. [in russian].

11. Gol'yanov A.I., Mihailov D.A. O raspredelenii naporov nasosnyh perekachivaushykh stancii, oborudovannyh nasosnymi agregatami s chastotno-reguliruyemym privodom // Transport i hranenie nefteproduktov i uglerodnogo sir'ya. 2011. №1. S. 6-9. [in russian].

12. Shabanov V.A. Osnovy metodiki vybora chisla i mesta ustanovki chastotno-reguliruyemykh elektroprivodov magistral'nyh nasosov // Neftegazovoe delo. 2012. T. 10. №2. S. 36-39. [in russian].

Сведения об авторах

Шабанов В.А., канд. техн. наук, проф., зав. кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий», ФГБОУ ВПО УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

V.A. Shabanov, Ph.D., prof., head of chair "Electrical engineering and electrical companies" FSBEI HPE USPTU, Ufa, Russian Federation
e-mail: ShabanovVA1@yandex.ru

Шарипова С.Ф., аспирант кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий», ФГБОУ ВПО УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

S.F. Sharipova, Post-graduate student, of chair "Electrical engineering and electrical companies" FSBEI HPE USPTU, Ufa, Russian Federation
e-mail: SharipovaSveta@yandex.ru