

УДК 62-03 (075.8)

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ЧАСТОТНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ МАГИСТРАЛЬНЫХ НАСОСОВ ПО ЭКВИВАЛЕНТНОМУ КОЭФФИЦИЕНТУ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ¹

Шабанов В.А.¹, Кабаргина О.В., Павлова З.Х.

Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа
e-mail: ¹ShabanovVA1@yandex.ru

Аннотация. *Рассматривается определение эквивалентных коэффициентов полезного действия перекачки при частотном регулировании электродвигателей магистральных насосов и при циклической перекачке в зависимости от режима работы технологического участка магистрального нефтепровода. Произведен расчет эквивалентных коэффициентов полезного действия для заданных режимов перекачки.*

Ключевые слова: *магистральный насос, электропривод магистрального насоса, частотное регулирование, нефтепровод, технологический участок, режим перекачки*

Магистральные трубопроводы для перекачки нефти и нефтепродуктов проектируются так, что номинальной производительности трубопровода соответствует номинальная подача магистральных насосов. Номинальному режиму работы соответствует максимальный (номинальный) коэффициент полезного действия (КПД) насосов и электродвигателей и минимальный удельный расход электроэнергии на перекачку. Однако режим работы трубопровода может отличаться от номинального. В настоящее время изменение режима работы нефтепроводов производится подбором числа и мощности магистральных насосов (МН) [1, 2]. При подаче меньше номинальной КПД насосов снижается. При этом растут относительные потери мощности и в МН, и в электродвигателях. Потери мощности еще больше возрастают при необходимости дросселировать излишки напора насосов.

Исключить дросселирование позволяет регулирование режима работы технологического участка методом циклической перекачки, при котором трубопровод последовательно (циклически) работает с разным числом (или разными параметрами) насосов. При циклической перекачке требуемая производительность трубопровода обеспечивается циклической работой на двух дискретных режимах с производительностями Q_1 и Q_2 . К недостаткам такого метода, наряду с необходимостью многочисленных включений и выключений электродвигателей и насосов, относится невозможность обеспечить высокий КПД в обоих режимах.

¹ При подготовке статьи использованы результаты исследований, выполненных при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ

В статье рассматривается сравнение режима перекачки трубопровода при частотно-регулируемом электроприводе (ЧРЭП) МН с режимом циклической перекачки по общему КПД на перекачку в пределах технологического участка.

При частотном регулировании КПД насосов зависит от двух регулируемых параметров: от подачи и от частоты вращения

Зависимость КПД насоса от производительности трубопровода при номинальной частоте вращения задается в каталогах и справочниках [3]. При изменении частоты вращения эту зависимость можно описать уравнением [4]

$$\eta_{нас.} = \eta_{нас.м} - \left(Q - Q_{м.} \frac{n}{n_{ном.}} \right)^2 \frac{\eta_{нас.м}}{Q_{м.}} \left(\frac{n}{n_{ном.}} \right)^2, \quad (1)$$

где $\eta_{нас.м}$ – максимальное значение КПД; $Q_{м.}$ – подача насоса, соответствующая максимальному КПД (при $n_{ном.} = 3000$ об/мин); n – частота вращения; $n_{ном.}$ – номинальная частота вращения.

Если подачу регулировать снижением частоты вращения, то максимальные значения КПД смещаются в область меньших подач. Это свойство КПД насосов позволяет сохранить высокий КПД насосов и электродвигателей в широком диапазоне режимов перекачки. При этом снижаются потери мощности и электроэнергии в МН и электродвигателях, повышается эквивалентный КПД перекачки и снижаются удельные затраты электроэнергии как по сравнению с методом подбора числа насосов, так и с методом циклической перекачки.

В общем виде объем электроэнергии, потребляемой из электрической сети (расход электроэнергии на перекачку) за время T при нерегулируемом электроприводе при N работающих МНА, равен

$$W = \rho \cdot g \cdot Q \cdot T \cdot \sum_{i=1}^N \frac{H_i}{\eta_{НАСi} \cdot \eta_{ЭДi}}, \quad (2)$$

где ρ – плотность перекачиваемой жидкости, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с²; Q – подача насоса, м³/с; H – напор, развиваемый насосом, м; $\eta_{нас.}$ – КПД насоса; $\eta_{эд}$ – КПД электродвигателя.

Напор, развиваемый нерегулируемым насосом, определяется по выражению

$$H_n = a - bQ^{2-m}, \quad (3)$$

где a , b – коэффициенты напорной характеристики магистрального насоса; m – коэффициент, зависящий от характера течения.

Если подбором числа насосов нельзя обеспечить заданный режим работы трубопровода с производительностью Q , то часть напора будет дросселироваться. В этом случае появляются дополнительные потери электроэнергии на дросселирование

$$W_{др} = \rho \cdot g \cdot Q \cdot T \cdot \frac{H_{др}}{\eta_{НАС} \cdot \eta_{ЭД}}, \quad (4)$$

где $H_{др}$ – потери напора на дросселирование.

При циклической перекачке время работы T_1 и T_2 на каждом из режимов за время цикла зависит от требуемой производительности. В общем случае в режиме «1» с производительностью Q_1 при $N - 1$ работающих МН и в режиме «2» с производительностью Q_2 при N работающих МН расход электроэнергии равен

$$W_1 = \rho \cdot g \cdot Q_1 \cdot T_1 \cdot \sum_{i=1}^{N-1} \frac{H_{1i}}{\eta_{нас1i} \cdot \eta_{эд1i}}, \quad (5)$$

$$W_2 = \rho \cdot g \cdot Q_2 \cdot T_2 \cdot \sum_{i=1}^N \frac{H_{2i}}{\eta_{нас2i} \cdot \eta_{эд2i}}, \quad (6)$$

$$T_1 = \frac{T \cdot (Q_2 - Q)}{Q_2 - Q_1}; T_2 = \frac{T \cdot (Q - Q_1)}{Q_2 - Q_1}, \quad (7)$$

где ρ – плотность перекачиваемой жидкости, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с²; Q – подача насоса, м³/с; H – напор, развиваемый насосом, м; $\eta_{нас}$ – КПД насоса; $\eta_{эд}$ – КПД электродвигателя.

Общий расход электроэнергии за время $T = T_1 + T_2$ при циклической перекачке

$$W_{цп} = \rho \cdot g \cdot Q_1 \cdot T_1 \cdot \sum_{i=1}^N \frac{H_{1i}}{\eta_{нас1i} \cdot \eta_{эд1i}} + \rho \cdot g \cdot Q_2 \cdot T_2 \cdot \sum_{i=1}^{N+1} \frac{H_{2i}}{\eta_{нас2i} \cdot \eta_{эд2i}}. \quad (8)$$

При ЧРЭП МН расход электроэнергии на перекачку всеми МН технологического участка при одном регулируемом насосе равен

$$W_3 = \rho \cdot g \cdot Q \cdot T \left(\sum_{i=1}^{N_1} \frac{H_i}{\eta_{наси} \cdot \eta_{эди}} + \frac{H_p}{\eta_{нас} \cdot \eta_{эд} \cdot \eta_{пч}} \right), \quad (9)$$

где N_1 – число нерегулируемых насосов;

H_p – напор, развиваемый регулируемым насосом:

$$H_p = a_p \cdot v^2 - b_p Q^{2-m}, \quad (10)$$

где $v = \omega/\omega_{ном}$ – относительная частота вращения насоса; a_p , b_p – коэффициенты напорной характеристики регулируемого насоса.

Из уравнения баланса напоров скорость вращения регулируемого насоса [5]:

$$v^2 = \frac{(b_p + B_2) \cdot Q^{2-m} - A_2}{a_p}. \quad (11)$$

При нескольких регулируемых МН расход электроэнергии будет

$$W_3 = \rho \cdot g \cdot Q \cdot T \left(\sum_{i=1}^{N_1} \frac{H_i}{\eta_{наси} \cdot \eta_{эди}} + \sum_{i=1}^{N_2} \frac{H_i}{\eta_{насPi} \cdot \eta_{эдри} \cdot \eta_{пчи}} \right), \quad (12)$$

где N_1 – число нерегулируемых МН; N_2 – число регулируемых МН.

Полезный расход электроэнергии на перекачку

$$W_{пол} = \rho \cdot g \cdot Q \cdot T \cdot H_{тр}, \quad (13)$$

где $H_{тр}$ – потери напора в трубопроводе.

Разделив полезный расход электроэнергии на объем электроэнергии, потребляемой из электрической сети, получим общий или эквивалентный КПД

перекачки $\eta_{\text{Э}} = W_{\text{пол}}/W_p$, где W_p –электроэнергия, потребляемая из электрической сети.

При нерегулируемом электроприводе, выполняя деление уравнения (13) на (2), находим

$$\eta_{\text{Э}} = \frac{H_{\text{ТР}}}{\sum_1^N \frac{H_i}{\eta_{\text{НАС}i} \cdot \eta_{\text{ЭД}i}}}.$$

Для режима циклической перекачки из выражений (6) и (3):

$$\eta_{\text{Э}} = \frac{H_{\text{ТР}}}{q_1 \cdot \sum_1^N \frac{H_i}{\eta_{\text{НАС}i} \cdot \eta_{\text{ЭД}i}} + q_2 \cdot \sum_1^{N-1} \frac{H_i}{\eta_{\text{НАС}i} \cdot \eta_{\text{ЭД}i}}}, \quad (14)$$

где

$$q_{T_1} = \frac{Q_1 \cdot T_1}{Q \cdot T} \quad \text{и} \quad q_{T_2} = \frac{Q_2 \cdot T_2}{Q \cdot T} \quad (15)$$

– относительные значения объемов перекачки в режимах «1» и «2» за время T_1 и T_2 .

При ЧРЭП одного из МН технологического участка из выражений (9) и (13)

$$\eta_{\text{Э}} = \frac{H_{\text{ТР}}}{\sum_1^{N-1} \frac{H_i}{\eta_{\text{НАС}i} \cdot \eta_{\text{ЭД}i}} + \frac{H_p}{\eta_{\text{НАС},p} \cdot \eta_{\text{ЭД},p} \cdot \eta_{\text{ПЧ}}}}.$$

В общем случае при ЧРЭП нескольких насосов из выражений (2) и (13)

$$\eta_{\text{Э}} = \frac{H_{\text{ТР}}}{\sum_1^{N_1} \frac{H_{Hi}}{\eta_{\text{НАС}i} \cdot \eta_{\text{ЭД}i}} + \sum_1^{N_2} \frac{H_{Pi}}{\eta_{\text{НАС}i} \cdot \eta_{\text{ЭД}i} \cdot \eta_{\text{ПЧ}}}}. \quad (16)$$

Пример

Исходные данные. Технологический участок нефтепровода состоит из четырех НПС, на которых установлены МН типа НМ 10000-210. На головной НПС 1 установлены подпорные насосы типа НПВ 5000-120. Высотные отметки и длины линейных участков нефтепровода представлены в табл. 1. Основные параметры насосов НМ 10000-210 и НПВ 5000-120 приведены в табл. 2.

Требуемая производительность нефтепровода 7800 м³/ч. Из гидравлического расчета известно, что при двух работающих насосах производительность трубопровода $Q_1 = 7400$ м³/ч, а при трех работающих насосах $Q_2 = 8270$ м³/ч. Потери напора в трубопроводе $H_{\text{ТР}} = 685$ м. Номинальный КПД электродвигателей $\eta_{\text{ЭДр}} = 0,977$, КПД преобразователя частоты $\eta_{\text{ПЧ}} = 0,976$.

Найти эквивалентные КПД в режиме циклической перекачки и при ЧРЭП.

Таблица 1. Высотные отметки НПС и длины линейных участков

НПС	Высотная отметка z_i , м	№ км	Расстояние от начала нефтепровода, км	Длина линейного участка, м	Номер участка
НПС 1	400	1242	0	62000,0	1
НПС 2	450	1304	62	88000,0	2
НПС 3	384	1392	150	87000,0	3
НПС 4	154	1479	237	110000,0	4
Конечный пункт	154	1589	347	-	-

Таблица 2. Основные параметры насосов

Марка насоса	Номинальные параметры			Коэффициенты $H(Q)$ характеристики насоса
	Подача, м ³ /ч	Напор, м	КПД, %	
НМ 10000-210 ($D_2 = 495$ мм)	10000	210	89	$a = 335,0$ $b = 1,2 \cdot 10^{-6}$
НПВ 5000-120	5000	120	85	$a = 137,7$ $b = 1,28 \cdot 10^{-6}$

Решение.

Режим циклической перекачки.

1. По формулам (7) в режиме циклической перекачки время работы с каждой производительностью соответственно $T_1 = 13$ ч, $T_2 = 11$ ч.

2. По выражениям (15) $q_{T_1} = 0,514$ и $q_{T_2} = 0,486$.

3. По формуле (1) КПД насосов в режимах 1 и 2 при номинальной частоте вращения: $\eta_{нас.1} = 0,847$; $\eta_{нас.2} = 0,875$.

4. По [3] определяются коэффициенты загрузки и КПД электродвигателей в режимах «1» и «2»: $\eta_{эд1} = 0,952$, $\eta_{эд2} = 0,953$.

5. По формуле (14) определяется эквивалентный КПД при циклической перекачке $\eta_{\Sigma} = 0,874$.

Режим работы с производительностью 7800 м³/ч может быть обеспечен при ЧРЭП одного МН при двух нерегулируемых насосах. Из уравнения баланса напоров определяется число оборотов регулируемого насоса $n = 2170$ об/мин.

6. По формулам (3) и (10) определяются напоры нерегулируемых H_n и регулируемого H_p насосов при производительности $Q = 7800$ м³/ч:

$$H_n = 261 \text{ м}; H_p = 101,5 \text{ м}.$$

7. По формуле (1) определяются значения КПД регулируемого и нерегулируемого насосов $\eta_{нас.p} = 0,886$; $\eta_{нас.n} = 0,862$.

8. По [3] определяются коэффициент загрузки и КПД нерегулируемого двигателя $K_{zn} = 0,7$; $\eta_{эдн} = 0,952$. КПД частотно-регулируемого двигателя принимается равным номинальному $\eta_{эдр} = 0,977$, а КПД преобразователя частоты $\eta_{пч} = 0,976$

9. По формуле (16) эквивалентный КПД технологического участка при частотном регулировании $\eta_{\varnothing} = 0,903$.

Вывод. Эквивалентный КПД при циклической перекачке 0,874 меньше эквивалентного КПД при частотном регулировании 0,903 примерно на 3 %.

Таким образом, экономический эффект при использовании частотно-регулируемого электропривода вместо циклической перекачки достигается за счет повышения КПД насосов и электродвигателей. При нерегулируемом электроприводе КПД насосов и электродвигателей зависит от нагрузки и снижается при снижении производительности трубопровода. При регулируемом электроприводе КПД насосов и электродвигателей можно поддерживать близким к максимальным значениям. Поэтому в основе методики оценки экономической эффективности частотного регулирования МНА удобно использовать эквивалентный КПД перекачки.

При подготовке статьи использованы результаты исследований, выполненных при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ.

Литература

1. Новоселов В.Ф., Муфтахов Е.М. Технологический расчет нефтепроводов: Учебное пособие. Уфа: Издательство УГНТУ, 1996. 43 с.
2. Коршак А.А., Нечваль А.М. Трубопроводный транспорт нефти, нефтепродуктов и газа: Учеб. для вузов. Уфа.: ООО «ДизайнПолиграфСервис», 2001. 571 с.
3. Нечваль А.М. Основные задачи при проектировании и эксплуатации магистральных нефтепроводов. Учебное пособие. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2005. 81 с.
4. Гришин А.П., Гришин В.А. Коэффициент полезного действия частотно-регулируемого электронасоса // Автоматизация и информатизация электрифицированного сельскохозяйственного производства: Научные труды. Том 89. М: ВИЭСХ, 2004. С. 118 - 127.
5. 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 (дата обращения 17.11.2011).

EVALUATING THE EFFECTIVENESS OF ADJUSTABLE-FREQUENCY ELECTRIC DRIVES OF MAIN PUMPS

V.A. Shabanov, O.V. Kabargina, Z.H. Pavlova
Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia
e-mail: ¹ShabanovVA1@yandex.ru

Abstract. *The article is devoted to the equivalent efficiency of adjustable-frequency electric drives of the main pumps and cycle regimes. The influence regime pipeline and the main pumps to the equivalent efficiency are considered. Examples determination of the equivalent efficiency of adjustable-frequency electric drives of the main pumps and cycle regimes are given.*

Keywords: *main pump, electric drive main pump, frequency regulation, pipeline, technological area, operation mode of the main pipeline*

References

1. Novoselov V.F., Muftakhov E.M. Tekhnologicheskii raschet nefteprovodov: Uchebnoe posobie (Technological calculations for oil pipelines: Study guide). Ufa, UGNTU, 1996. 43 p.
2. Korshak A.A., Nechval' A.M. Truboprovodnyi transport nefi, nefiproduktov i gaza: ucheb. dlya vuzov (Oil and gas pipeline transportation. Textbook for high schools). Ufa, DizainPoligrafServis, 2001. 571 p.
3. 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.
4. Grishin A.P., Grishin V.A. Koeffitsient poleznogo deistviya chastotno-reguliruemogo elektronasosa (The efficiency of frequency-regulated electric pump), *Avtomatizatsiya i informatizatsiya elektrifitsirovannogo sel'skokhozyaistvennogo proizvodstva: Nauchnye trudy (Automation and Informatization electrified agricultural production: Scientific papers)*. Vol. 89. Moscow, VIESKh, 2004. PP. 118 - 127.
5. Shabanov V.A., Kabargina O.V. Opredelenie nizhnei granitsy diapazona chastotnogo regulirovaniya elektrodvigately magistral'nykh nasosov (Determine the lower range limits of frequency regulation electric drive main pump), *Electronic scientific journal "Oil and Gas Business"*, 2010, Issue 2, 8 p.
http://www.ogbus.ru/authors/Shabanov/Shabanov_3.pdf.