УДК 621.31;62-03

АНАЛИЗ КОЭФФИЦИЕНТА ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ МАГИСТРАЛЬНЫХ НАСОСОВ ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ НЕФТЕПРОВОДОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЧАСТОТНО РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА В ФУНКЦИИ РЕГУЛЯТОРОВ ДАВЛЕНИЯ

Шабанов В.А., Хакимов Э.Ф., Шарипова С.Ф.
ФГБОУ ВПО Уфимский государственный нефтяной технический университет,
e-mail: ShabanovVA1@yandex.ru

Аннотация. В статье исследуется влияние частотно-регулируемого электропривода (ЧРП) на коэффициент полезного действия (КПД) магистральных насосов на эксплуатируемых нефтепроводах. Рассмотрено изменение КПД при использовании ЧРП в тех режимах, где используется регулирование давления в трубопроводе с помощью заслонок. Анализ выполняется по карте технологических режимов и сведениям о соблюдении режимов эксплуатируемого нефтепровода. Приведены результаты расчета КПД магистральных насосов для технологического участка эксплуатируемого нефтепровода.

Ключевые слова: частотно-регулируемый электропривод, магистральный насос, нефтепровод, регулятор давления, коэффициент полезного действия.

Роль трубопроводного транспорта в системе нефтегазовой отрасли промышленности чрезвычайно высока. Он является основным видом транспорта нефти от мест добычи на нефтеперерабатывающие заводы и экспорт [1]. Основными потребителями электрической энергии на нефтеперекачивающих станциях (НПС) являются магистральные насосы (МН). Поэтому актуальной задачей является повышение эффективности их работы. Одним из путей повышения эффективности работы МН является частотно-регулируемый электропривод (ЧРП) [2, 3, 4]. Внедрение ЧРП МН позволит решить задачу не только снижения потребления электроэнергии, но и исключить возникновение гидравлических ударов в системе трубопроводов; повысить уровень автоматизации технологических процессов. В статье рассматривается изменение КПД МН при использовании ЧРП в тех режимах, где используется регулирование давления в трубопроводе с помощью заслонок (дросселирование). Анализ выполняется по карте технологических режимов и сведениям о соблюдении режимов.

В настоящее время основным способом регулирования режима работы магистральных нефтепроводов является изменение числа насосов в пределах технологического участка. При подборе числа насосов, производительность трубопровода может отличаться от номинальной подачи насосов, при этом МН

работают не в оптимальном режиме и их коэффициент полезного действия насоса $\eta_н$ снижается по сравнению с номинальным значением

$$\eta_{н.} = \eta_{ном} - (1-q)^2 \cdot \eta_{ном}, \quad (1)$$

где $\eta_{ном}$ – номинальный КПД насоса; $q = Q/Q_{ном}$ – относительное значение подачи насоса; Q – производительность трубопровода; $Q_{ном}$ – номинальная подача насоса.

Коэффициент полезного действия МН по (1) достигает максимального (номинального) значения в режимах, когда производительность нефтепровода равна номинальной подаче насоса, и снижается при снижении производительности.

В случае если подбором числа насосов невозможно установить требуемую производительность, а также для выполнения ограничений по напорам и подпорам, используются регуляторы давления, которые устанавливаются на выходах НПС. При использовании регуляторов давления, во-первых, снижается значение производительности трубопровода q, что в соответствии с выражением (1) ведет к снижению КПД МН [5, 6]. И, во-вторых, имеют место дополнительные потери мощности на регулирование, пропорциональные величине потерь давления в регуляторе

$$\Delta P_{др} = \Delta p_{др} \cdot Q, \quad (2)$$

где $\Delta p_{др}$ – дросселируемое давление.

Для изменения производительности трубопровода вместо регуляторов давления можно использовать ЧРП МН. При изменении частоты вращения зависимость КПД насосов в меньшей степени снижается при снижении подачи, так как он зависит не только от производительности трубопровода, но и от скорости вращения:

$$\eta_{н.} = \eta_{ном} - (\nu - q)^2 \cdot \eta_{ном} \cdot \nu^2, \quad (3)$$

где $\nu = \omega/\omega_{НОМ}$ - относительная скорость вращения насоса; ω – частота вращения; $\omega_{ном.}$ - номинальная частота вращения.

При этом в случае использования ЧРП в функции регуляторов давления, во-первых, исключаются потери мощности в регуляторе давления, и, во-вторых, повышается КПД насоса, так как КПД регулируемого МН по (3) при скорости вращения меньше номинальной (при $\nu<1,0$) во многих случаях будет выше, чем его КПД по (1) без использования ЧРП. Схема НПС с использованием ЧРП приведена на рисунке 1.

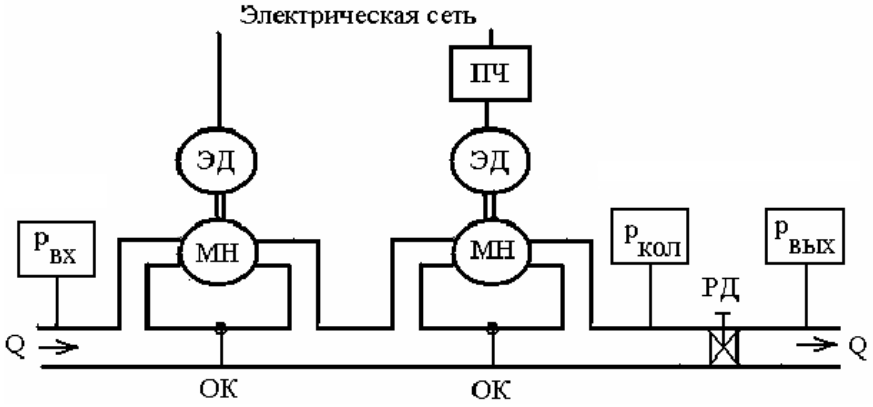

Рисунок 1. Схема НПС с ЧРП МН
ПЧ – преобразователь частоты; ЭД – электродвигатель; ОК – обратный клапан;
РД – регулятор давления

При использовании регуляторов давления РД на выходе НПС давление в коллекторе $p_{кол}$ выше, чем давление на выходе НПС $p_{вых}$. При использовании ЧРП вместо регуляторов давления будет соблюдаться равенство $p_{кол} = p_{вых}$. Это означает, что при использовании ЧРП снижается давление в коллекторе НПС. При этом уменьшается напор, который должен развивать регулируемый МН, и потребляемая им мощность. Это приводит к снижению мощности, потребляемой на перекачку из электрической сети.

При использовании ЧРП в функции регулятора давления для обеспечения требуемого давления на выходе НПС необходимо снизить частоту вращения насоса до значения [6]:

$$\nu = \sqrt{1 - \frac{\Delta H}{a}}\,. \tag{4}$$

где

$$\Delta H = \Delta p_{др} / (\rho \cdot g); \tag{5}$$

а – коэффициент аппроксимированной напорной характеристики [7];

$$\Delta p_{др} = p_{кол} - p_{вых} \tag{6}$$

– потери давления в дросселирующей заслонке;

ρ – плотность жидкости; g – ускорение свободного падения.

При планировании режимы работы технологического участка трубопровода составляется карта технологических режимов (КТР), в которой указываются все возможные режимы перекачки и их параметры: производительность трубопровода, тип, количество и схема работы используемых насосных агрегатов, давление на входе, выходе и коллекторе НПС, удельное потребление электроэнергии. При

эксплуатации нефтепровода составляется таблица «Сведения о соблюдении режимов», в которых указываются фактически используемые режимы из КТР и их технические параметры, в том числе продолжительность работы на каждом из режимов. Из сведений о фактическом соблюдении режимов и данных из КТР можно получить всю информацию, необходимую для анализа режимов с использованием регуляторов давления на эксплуатируемом нефтепроводе. В таблице 1 приведены данные по количеству таких режимов за 2011 на НПС технологического участка «Ленинск – Нурлино» нефтепровода УБКУА. В составе технологического участка пять НПС, которые пронумерованы НПС1….НПС5.

Таблица 1. Сведения об использовании регуляторов давления

Месяц	Количество режимов с использование регулирования давления				
	НПС 1	НПС 2	НПС 3	НПС 4	НПС 5
Январь	12	0	0	1	1
Февраль	17	0	0	0	0
Март	8	0	0	0	0
Апрель	5	0	0	0	0
Май	13	0	0	0	0
Июнь	13	0	0	0	0
Июль	1	0	0	0	0
Август	23	0	0	1	1
Сентябрь	6	0	0	0	0
Октябрь	15	0	0	0	0
Ноябрь	22	0	0	0	0
Декабрь	18	0	0	0	0
Всего за год	153	0	0	2	2

Всего за год регулирование давление использовалось в 157 режимах, причем в 153 случаях регулирование давление использовалось на головной НПС (на НПС 1). При этом для регулирования давления с помощью ЧРП достаточно использовать только один преобразователь частоты, устанавливаемый на головной станции.

Карты технологических режимов и сведения о соблюдении режимов эксплуатируемых нефтепроводов содержат сотни режимов. Для целей исследования КПД насосов все режимы в сведениях о соблюдении режимов были разбиты на группы с постоянным числом МН. Такие режимы обозначают «0NN», где «NN» - суммарное число включенных МН на НПС технологического участка. Например, режим «001» означает, что на всех пяти НПС технологического участка в работе один МН, «002» - в работе два МН и т.д.

По сведениям из КТР для каждого из режимов таблицы 1 составляется база данных, в которую заносятся: производительность трубопровода Q, тип и количество используемых агрегатов, давление на входе $p_{вх}$, выходе $p_{вых}$ и коллекторе

$p_{кол}$ НПС. Пример такой базы данных с результатами расчетов по формулам (1), (3) – (6) для технологического участка «Ленинск–Нурлино» нефтепровода УБКУА приведен в таблице 2.

Таблица 2. Фрагмент выборки информации из КТР и результаты расчетов

№ режима	Q, т/2ч	q, о.е.	$p_{вх}$, кгс/см^2	$p_{вых}$, кгс/см^2	$p_{кол}$, кгс/см^2	$\Delta p_{др}$ кгс/см^2 по (6)	ν по (4)	КПД нерег. МН по (1)	КПД рег. МН по (3)	Δ КПД
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
001(Cx1)(007)	7891,67	0.40	9,2	26,0	33,7	7,7	0,81	0,63	0,81	0,18
001(Cx1)(008)	8200,00	0,41	9,4	27,0	33,2	6,2	0,85	0,64	0,80	0,16
002(Cx1)(422)	12416,67	0.62	10,0	29,7	32,2	2,5	0,94	0,82	0,85	0,03
002(Cx1)(522)	12416,67	0,62	10,0	29,2	32,6	3,4	0,92	0,82	0,86	0,04
003(Cx10)(001)	13973,33	0,67	9,2	45,0	48,1	3,1	0,93	0,86	0,88	0,02

Режимы в таблице 2 расположены в порядке возрастания производительности трубопровода. По результатам расчетов, приведенных в таблице 2, можно обнаружить следующие закономерности. Требуемая скорость вращения МН при использовании ЧРП в качестве регулятора давления, тем ниже, чем больше потери давления были в регуляторе давления. При малых потерях давления (например, 2,5 кгс/см^2 в таблице 2) скорость вращения МН близка к номинальной (0,94). И для нерегулируемого, и для регулируемого МН КПД насоса растет при увеличении производительности нефтепровода. При этом КПД регулируемого МН все время остается выше, чем КПД нерегулируемого МН, однако разность значений КПД снижается по мере увеличения производительности нефтепровода (Δ КПД в таблице 2). В режиме 003 значение Δ КПД снижается до 0,02. Это означает, что эффективность ЧРП снижается по мере увеличения числа работающих МН.

Рассмотрим перечисленные свойства более подробно. На технологическом участке «Ленинск – Нурлино» нефтепровода УБКУА в 2011 году использовались режимы типа 001, 002, 003, 004, 005 и 007. Каждая из групп режимов 001, 002 и т.д. содержит множество режимов, отличающихся глубиной регулирования давления и производительностью нефтепровода. Результаты расчета КПД в режимах 001 и 005 представлены в таблицах 3 и 4.

Таблица 3. КПД насосов в режимах с одним работающим МН (режимы 001)

Q по КТР, м^3/ч	4265,8	4559,6	4574,0	4737,7	4746,8	5585,1
КПД нерегулируемого МН по (1)	0,597	0,627	0,628	0,643	0,644	0,716
КПД регулируемого МН по (3)	0,771	0,814	0,814	0,796	0,705	0,842
Повышение КПД МН при ЧРП	0,174	0,187	0,186	0,153	0,061	0,126

Таблица 4. КПД насосов в режимах с пятью работающими МН (режимы 005)

Q по КТР, м^3/ч	9870,2	9945,8	10014,6	10050,5	10050,4
КПД нерегулируемого МН по (1)	0,890	0,890	0,890	0,890	0,890
КПД регулируемого МН по (3)	0,888	0,890	0,877	0,890	0,888
Изменение КПД МН при ЧРП	-0,002	0,000	-0,003	0,000	-0,002

Из таблицы 3 видно, что во всех режимах 001 использование ЧРП вместо дросселирования приводит к повышению КПД МН, причем КПД повышается, как правило, более, чем на 10%. Однако в режимах 005, когда включены пять МН, использование ЧРП одного из них для регулирования давления не только не приводит к повышению КПД МН, но даже может привести к его снижению.

Графики зависимости КПД от производительности трубопровода для всех режимов работы нефтепровода от 001 до 007 представлены на рисунках 2-4.

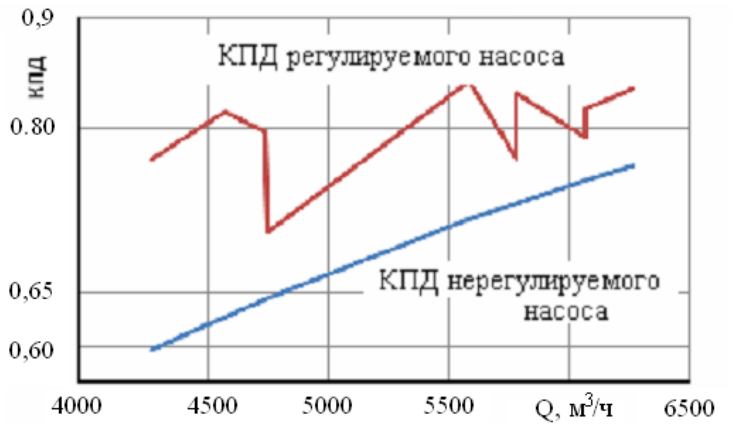

Рисунок 2. КПД насосов в режимах 001

Ступенчатые изменения КПД регулируемых насосов на рисунке 2 в режимах 001 объясняются тем, что при одной и той же производительности трубопровода может быть разной глубина дросселирования. При этом при одной и той же производительности трубоповода будет разной требуемая частота вращения насоса, и как следствие, разные значения КПД по формуле (3).

В режимах 002 (рисунок 3), а также в режимах 003-007 (рисунок 4) ступенчатое изменение КПД менее заметно, так как глубина дросселирования (регулирования давления) мала и ступеньки изменения КПД в принятом масштабе также малы.

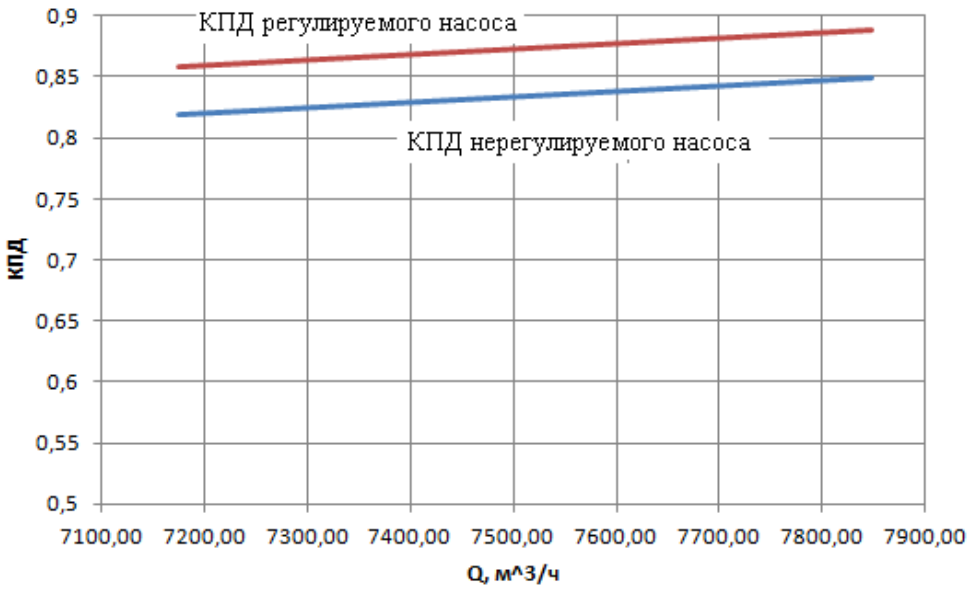

Рисунок 3. КПД насосов в режимах 002

На рисунке 4 приведены сводные графики зависимости КПД МН от производительности нефтепровода для всех возможных режимов перекачки, приведенных в КТР. Графики имеют прерывистый характер, так как при изменении числа включенных насосов значение производительности нефтепровода изменяется ступенчато.

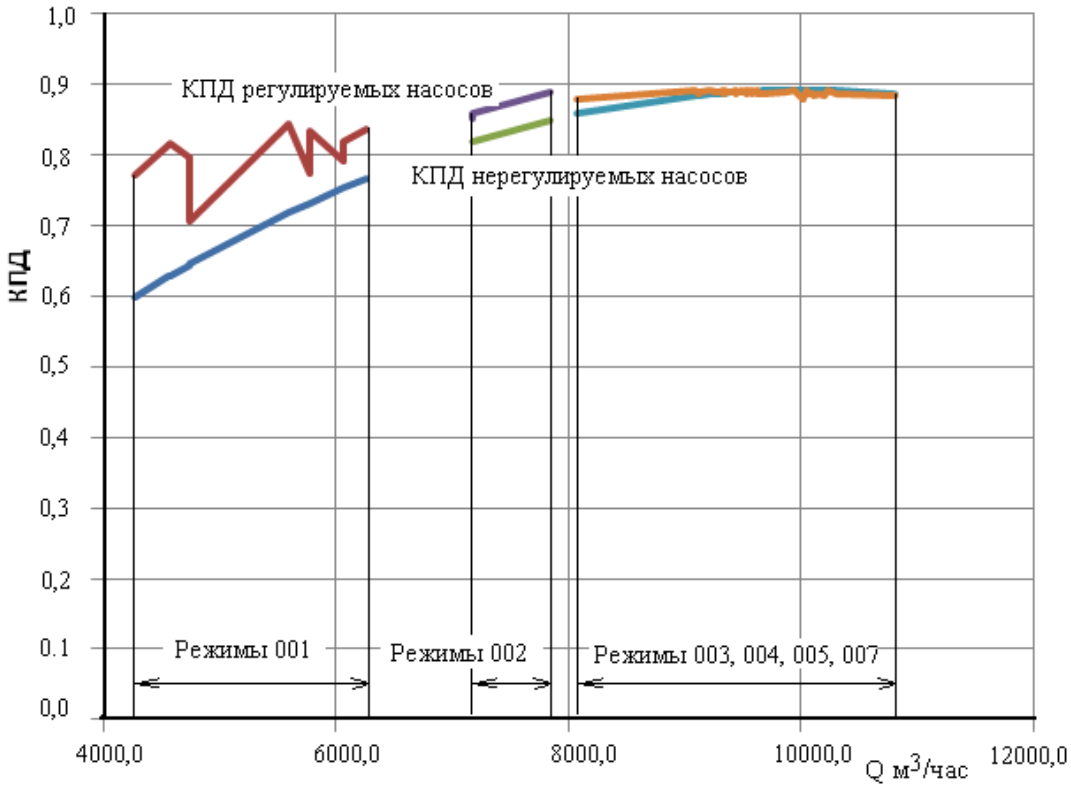

Рисунок 4. Сводные графики КПД насосов в режимах 001-007

Из таблиц 2, 3 и графиков на рисунках 2-4 видно, что наиболее существенное повышение КПД при использовании ЧРП вместо дросселирования имеет место в режимах 001 (до 18%) и в режимах 002, в которых КПД повышается на 3 – 4%. В режимах 003 КПД повышается на 1-2%. В других режимах (004, 005 и 007) использование ЧРП в функции регуляторов давления практически не повышает КПД насосов. Это объясняется тем, что производительность насосов в таких режимах близка к номинальной, и значение q в выражении (3) близко к единице. В таких режимах использование ЧРП может оказаться не целесообразным. Установка ЧРП в этих случаях может привести даже к повышению расхода электроэнергии за счет потерь мощности в преобразователях частоты. Следовательно, использование ЧРП для регулирования давления наиболее эффективно при небольшом числе работающих МН, когда производительность трубопровода существенно отличается от номинальной подачи насосов.

Построим линию максимально возможных КПД при использовании ЧРП в качестве регуляторов давления на технологическом участке «Ленинск – Нурлино». Для этого проведем огибающую кривую через максимальные значения КПД регулируемого МН в разных режимах. Такая огибающая максимальных КПД показана на рисунке 5 (кривая 3). Возможный диапазон значений КПД регулируемого насоса показан на рисунке 5 штриховкой.

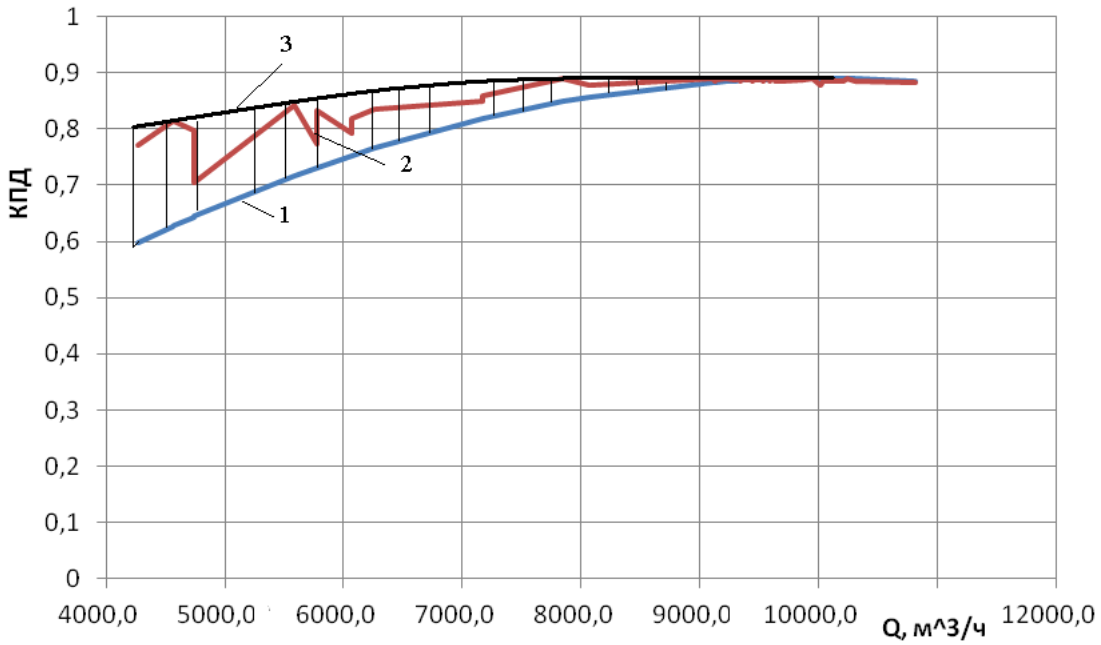

Рисунок 5. Диапазон изменения КПД регулируемого насоса
1 – КПД нерегулируемого насоса; 2 – КПД регулируемого насоса по расчетам режимов из КТР; 3 – огибающая наибольших значений КПД регулируемого насоса

Кривая 3 на рисунке 5 соответствует максимальной глубине регулирования давления Δрег.м по КТР. В зависимости от фактической глубины регулирования давления по КТР КПД регулируемого насоса располагается в заштрихованной зоне между кривыми 1 и 3. При этом кривая 3 определяет максимально возможные значения КПД регулируемого насоса при заданных требованиях к допустимой величине потерь давления в регуляторе давления.

Выводы

1. Для регулирования давления на исследуемом нефтепроводе в большинстве случаев регулятор давления используется на головной НПС. При этом для регулирования давления с помощью ЧРП достаточно использовать только один преобразователь частоты, устанавливаемый на головной станции.
2. Зависимость КПД регулируемого магистрального насоса от подачи неоднозначна и может быть ступенчатой, так как КПД насоса зависит не только от производительности трубопровода, но и от требуемой частоты вращения насоса, которая, в свою очередь, зависит от глубины регулирования давления.
3. При использовании ЧРП вместо регуляторов давления КПД насосов повышается. Это повышение тем больше, чем меньше насосов участвуют в перекачке. Наибольшее значение КПД регулируемые насосы имеют в режимах 001, когда в перекачке участвует один магистральный насос. В этих режимах КПД может повышаться на 18%. В режимах 002 КПД повышается на 4 – 6%, а в режимах 003 – на 1-2%. В других режимах (004, 005 и 007) использование ЧРП практически не повышает КПД насосов. В таких режимах использование ЧРП не целесообразно. Установка ЧРП в этих случаях может привести к повышению расхода электроэнергии за счет потерь мощности в преобразователях частоты.
4. Максимально возможные значения КПД насосов при использовании ЧРП зависят от максимально допустимой глубины регулирования давления при дросселирования. Чем больше допустимая глубина регулирования давления, тем выше может быть достигнут КПД регулируемого насоса при использовании ЧРП в функции регулятора давления.

Литература

1. Коршак А.А., Нечваль А.М. Трубопроводный транспорт нефти, нефтепродуктов и газа: учеб. для вузов. Уфа: ООО «ДизайнПолиграфСервис». 2001. 571 с.

2. 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.

3. Шабанов В.А., Кабаргина О.В. Достоинства и перспективы использования частотно-регулируемого электропривода магистральных насосов на НПС. // Управление качеством в нефтегазовом комплексе. 2011. Т. 2. С. 63-66.

4. Шабанов В.А., Кабаргина О.В. Перспективы использования частотно-регулируемого электропривода магистральных насосов на НПС. Уфа: Изд-во УГНТУ. 2010. 63 с.

5. Шабанов В.А., Ахметгареев А.А. К вопросу о выборе оптимального режима работы магистрального насоса при частотно-регулируемом приводе // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2012. № 3. С. 7-10.

6. Шабанов В.А.. Хакимов Э.Ф., Пирожник Н.П. Анализ энергоэффективности частотно-регулируемого электропривода на действующих НПС за счет повышения КПД магистральных насосов. // Нефтегазовое дело: науч.-техн. журн. 2012. Т.10, №2. С.55-60.

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

UDC 621.31, 62-03

ANALYSIS EFFICIENCY MAIN PUMPS OIL PIPELINES OPERATED USAGE VFD MP AS A FUNCTION OF PRESSURE REGULATOR

V.A. Shabanov, E.F. Khakimov, S.F. Sharipova
FSBEI Ufa state petroleum technical university
e-mail: ShabanovVA1@yandex.ru

Abstract. The paper examines the impact of the variable frequency drive (VFD) by the efficiency of the main pumps in operating pipelines. The change in efficiency when using VFD in those modes, which use pressure control in the pipeline with the dampers. The analysis is performed on the table of process conditions, and information on compliance regimes operated pipeline. The results of the calculation of the efficiency of the main pumps for operated pipeline.

Keywords: variable frequency drive, main pump, pipeline, pressure regulator, efficiency.

References

1. Korshak A.A., Нечваль A.M. Pipeline transport of oil, oil products and gas: studies. for higher education institutions. Ufa: JSC Dizaynpoligrafservice, 2001. 571 pages.
2. Tumansky A.P. Optimization of transfer modes on the main oil pipelines with the oil pumping stations equipped with frequency and adjustable drives//Transport and storage of oil products. 2005. No. 8. Page 11-14.
3. Shabanov V.A., Kabargina O. V. Advantages and prospects of use of the frequency and adjustable electric drive of the main pumps on NPS//Quality management in an oil and gas complex, 2011. T. 2. - Page 63-66.
4. Shabanov V.A., Kabargina O. V. Prospects of use of the frequency and adjustable electric drive of the main pumps on NPS. Ufa: Publishing house УГНТУ, 2010. 63 pages.
5. Shabanov V.A., Akhmetgareev A.A. To a question of a choice of an optimum operating mode of the main pump at a frequency and adjustable drive//Transport and storage of oil products and hydrocarbonic raw materials. 2012. No. 3. Page 7-10.
6. Shabanov V.A., Khakimov E.F., Pirozhnik N.P. Анализ энергоэффективности частотно-регулируемого электропривода на действующих НПС за счет повышения КПД магистральных насосов //scientific magazine "Oil and gas business". 2012. T10. No. 2. Page 55-60.

7. Nechval' A.M. Osnovnye zadachi pri proektirovanii i ekspluatatsii magistral'-nykh nefteprovodov. Uchebnoe posobie (The main problems of the design and ope-ration of main oil pipelines. Study guide). Ufa: UGNTU, 2005. 81 p.

Сведения об авторах

Шабанов В. А., канд. техн. наук; проф., заведующий кафедрой «Электротехника и электрооборудование предприятий», ФГБОУ ВПО УГНТУ.
V.A. Shabanov, ph. d. prof. head of chair «Electrical Engineering and Electrical Industries», FSBEI USPTU
e-mail: ShabanovVA1@yandex.ru

Хакимов Э. Ф.; студ. гр. БАЭ-09, ФГБОУ ВПО УГНТУ
E.F. Khakimov, stud. BAE-09 FSBEI USPTU

Шарипова С.Ф., аспирант ФГБОУ ВПО УГНТУ
S.F Sharipova, post graduate student FSBEI USPTU